



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑩ Off nlegungsschrift  
DE 196 29 583 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
H 01 L 39/14  
H 01 L 39/24

DE 196 29 583 A 1

②1 Aktenzeich n: 196 29 583.1  
②2 Anmeldetag: 23. 7. 96  
④3 Offenlegungstag: 29. 1. 98

⑦1 Anmelder:  
Dornier GmbH, 88048 Friedrichshafen, DE

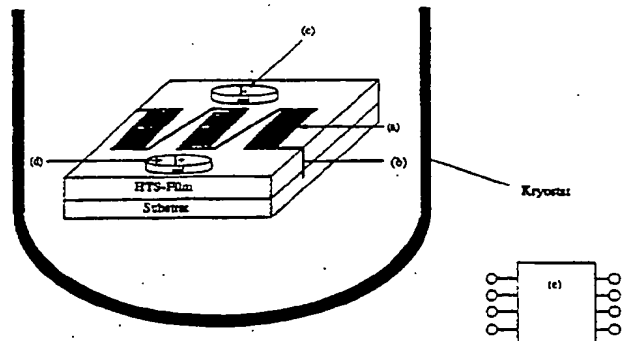
⑦2 Erfinder:  
Zehe, Alfred, Prof. Dr.Dr.h.c., Puebla, MX

⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 41 24 048 C2  
US 51 14 912 A  
EP 03 82 609 A2  
WO 92 22 426 A1  
JP 08-1 62 681 A  
JP 05-2 91 832 A  
US-Z: Appl.Phys. Letters, Bd. 61, 1992, S. 1597-1599;  
US-Z: Proc. IEEE, Bd. 77, 1989, S. 1233-1248;  
US-Z: Appl.Phys. Letters, Bd. 61, 1992, S. 2598-2600;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Emitter- und/oder Detektorbauelement für Submillimeterwellen-Strahlung und Verfahren zu seiner Herstellung

⑤7 Ein supraleitendes elektronisches Bauelement wird beschrieben, das spezifische Eigenschaften eines Emitters und/oder Detektors für elektromagnetische Strahlung im Submillimeterwellen-Gebiet aufweist. Es besteht aus einem planaren Netzwerk von Mikrobrücken (Stegen), die in einer dünnen Schicht eines Hochtemperatur-Supraleiters geformt werden. Letzterer wird mit den CuO<sub>x</sub>-Ebenen entweder senkrecht oder in einem Winkel  $\Theta$  ( $1^\circ < \Theta < 89^\circ$ ) zur Substratoberfläche geneigt epitaxial auf das Substrat aufgewachsen. Auf diese Weise enthält jede Mikrobrücke eine Stapelfolge übereinander angeordneter (intrinsischer) Josephson-Kontakte. Supraleitende Verbindungen (seriell und parallel) zwischen einzelnen Mikrobrücken werden ebenfalls beschrieben, wodurch eine Optimierung von Schaltkreis-Parametern, wie z. B. der Impedanzanpassung an den Strahlungsraum und Maximierung der abgestrahlten Leistung möglich wird. Über externe Mittel einer elektronischen Steuerung kann z. B. die Frequenz und Intensität des Strahlungsfeldes beeinflusst (z. B. moduliert) werden. Insbesondere kann mit diesem Bauelement der Frequenzbereich zwischen dem fernen Infrarot und dem Mikrowellengebiet durchgängig überdeckt werden. Die vorliegende Beschreibung enthält auch einige Anwendungen des vorgeschlagenen Bauelements, wobei sowohl die Emission als auch die Detektion elektromagnetischer Strahlung rfaßt ist.



DE 196 29 583 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 11. 97 702 065/174

18/23

## Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein supraleitendes Bauelement, Herstellungstechnologien und Anwendungsfelder und insbesondere einen neuartigen Emittor und/oder Detektor für das Submillimeterwellen-Gebiet, sowie dessen vielfältige Anwendungen.

## Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

## 1. Anordnungen natürlicher Josephson-Kontakte

Die ersten Erkenntnisse zur Brauchbarkeit von Josephson-Kontakten als durchstimmbare Mikrowellen-Emittor und -Detektoren gehen auf die frühen Arbeiten von B. Josephson und S. Shapiro zurück. Es wurde jedoch schon sehr zeitig erkannt, daß ein einzelner Josephson-Kontakt eine zu geringe Leistung abstrahlt und zudem eine zu breite spektrale Verteilung aufweist, um als Mikrowellenstrahler praktische Anwendung zu finden. Diese Unzulänglichkeiten können bekanntermaßen über den Einsatz von Stapelfolgen von Josephson-Kontakten überwunden werden [Jain u. a. 1984; Bindslev Hansen und Lindelof 1984; Lukens 1990].

Sobald die Kopplung zwischen den Josephson Kontakten stark genug ist, kann es zu Selbstsynchronisation mit dem Effekt einer kohärenten Strahlungsemission aller Kontakte kommen [Lukens 1990; Konopka 1994]. Mögliche Kopplungsmechanismen und Kopplungsstärken sind im Detail bereits untersucht worden [Jain u. a.; Lukens 1990]. Die Linienbreite der elektromagnetischen Strahlung, die vom Kristallstapel emittiert wird, verkleinert sich in dem Maße, wie die Anzahl der Josephson-Kontakte in der Anordnung zunimmt. Sie kann sehr gering werden bei Vorliegen einer großen Zahl von Josephson-Kontakten [Lukens 1990; Wiesenfeld u. a. 1994; Konopka 1994].

Die Leistung der emittierten Strahlung erhöht sich ebenfalls mit der Zahl der Josephson-Kontakte und kann in großen Anordnungen auch beachtlich werden ( $P \geq 1 \text{ mW}$ ), was für viele praktische Anwendungen ausreicht [Bindslev Hansen und Lindelof 1984; Jain u. a. 1984; Konopka u. a. 1994; Wiesenfeld u. a. 1994]. Wichtig ist, daß eine gute Impedanzanpassung an den Lastwiderstand (z. B. der freie Raum) erreicht wird, weil sonst der größte Teil der Strahlung nicht aus dem Bauelement austritt, sondern sich im Inneren durch Vielfachreflexion aufbraucht.

Ein anderer Gesichtspunkt sind verschiedene Verlustmechanismen in den Kontakten. Beispielsweise sind die Kapazitäten der Kontakte für einen Leistungsverlust bei höheren Frequenzen verantwortlich [Lukens 1990; Wiesenfeld u. a. 1994], was auf die Anwendung möglichst kleinflächiger Josephson-Kontakte hindeutet. Kleine Kontaktflächen sind auch günstig zur Verringerung des Rauschens und der spektralen Linienbreite [Kunkel und Siegel 1994; Konopka 1994]. Der Stromfluß durch den Kontakt wird inhomogen, sobald zwischen der Breite  $w$  des Überganges und der Josephson-Eindringtiefe  $\lambda_J$  die Beziehung besteht,  $w \geq 4\lambda_J$  [Kunkel und Siegel 1994]. Es ist auch klar, daß für eine optimale Phasensynchronisation die kritischen Ströme ( $I_c$ ) durch alle Josephson-Kontakte sehr ähnlich sein müssen. Im allgemeinen wird eine Homogenität von mindestens  $\pm 5\%$  in linearen Stapelfolgen gefordert [Konopka

1994].

Die bisher genannten hohen Anforderungen können etwas abgeschwächt werden, wenn eine verteilte Anordnung äquidistanter Josephson-Kontakte entlang einer Ausbreitungsleitung gewählt wird. Allerdings müssen hierbei der Abstand zwischen den Josephson-Kontakten und die gewählte Strahlungswellenlänge übereinstimmen [Kukens 1990; Han u. a. 1994]. Offenbar wird hierbei die Durchstimmbarkeit der Strahlungsfrequenz stark beschnitten, allerdings zugunsten einer wesentlich erhöhten Emissionsleistung.

Es existieren zahlreiche experimentelle Untersuchungen über Anordnungen von Josephson-Kontakten, und einige beachtliche Ergebnisse wurden erzielt. Die meisten davon gründen sich auf konventionelle Supraleiter mit niedriger Sprungtemperatur, wie z. B. Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb-Dreischicht-Strukturen. Eine vollständige Phasensynchronisation wurde in linearen Anordnungen von 100 solcher Josephson-Kontakte nachgewiesen [Han u. a. 1993]. In einigen Fällen hat man eine Breitband-Antenne (z. B. logarithmische Spiralantenne u. a.) auf dem Chip integriert, und die in den Außenraum emittierte Strahlung wurde gemessen. In anderen Fällen wurde ein weiterer Josephson-Kontakt als Detektor über eine Ausbreitungsleitung an die Anordnung der Strahlungsemitter gekoppelt. Einige der besten erzielten Ergebnisse sind die folgenden: Eine Emission von  $P = 50 \mu\text{W}$  bei einer Frequenz von  $\nu = 400 - 500 \text{ GHz}$  wurde in einer verteilten Anordnung von 500 Josephson-Kontakten nachgewiesen [Han u. a. 1994]. In einem anderen Schaltkreis (Anordnung von  $10 \times 10$  Kontakten) ist Strahlung mit einer Linienbreite von  $\Delta\nu = 10 \text{ kHz}$  und einer Durchstimmbarkeit von  $\nu = 53 - 230 \text{ GHz}$  [Booi und Benz 1994] gemessen worden.

Mit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter in La-Ba-Cu-O durch G. Bednorz und K.A. Müller im Jahre 1986, und der damit verknüpften Erhöhung der kritischen Temperatur in ähnlichen Kupferoxid (Cuprat)-Verbindungen auf bis zu  $T_c > 160 \text{ K}$ , ist eine enorme Erwartungshaltung für eine Supraleitungselektronik bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs und darüber entstanden. In der Tat sind seitdem in Dutzenden von Forschungslabors der Welt Josephson-Kontakte in diesen neuen Werkstoffen nach mehreren verschiedenen Techniken erzeugt worden. Es wurde die Strahlungsemission als Folge des Josephson-Wechselstromes in künstlichen Josephson-Kontakten in Hochtemperatur-Supraleitern gemessen und analysiert [Kunkel und Siegel 1994]. In der gleichen Arbeit hat man Phasensynchronisation in Stufenkontakten über ein breites Frequenzband von  $\nu = 80 - 500 \text{ GHz}$  nachgewiesen. In größeren Anordnungen (Arrays) konnte nur eine teilweise (bis zu 4 Josephson-Kontakte) und zudem instabile Phasensynchronisation erreicht werden [Konopka 1994]. Als Grund ist herausgefunden worden, daß dies eine Folge der Inhomogenität (Ungleichartigkeit) solcher Stufenkontakte in Hochtemperatur-Supraleiter-Josephson-Kontakten ist, wo Variationen der kritischen Ströme von bis zu  $\pm 50\%$  auftreten [Konopka 1990]. In einer weiteren Arbeit werden Arrays von 5 und 10 Josephson-Übergängen aus nebeneinander liegenden Stufenkontakten untersucht, wiederum mit nur teilweiser Phasensynchronisation und sehr geringer Strahlungsleistung [Kunkel und Siegel 1994].

In mehreren Veröffentlichungen werden spektakuläre Aussagen über vielversprechende zukünftige Anwendungen von in Gruppen angeordneten Josephson-Kontakten gemacht. Beispielsweise werden Anwendun-

gen als Generatoren und Detektoren von Strahlung im GHz- und THz-Gebiet prognostiziert [Jain u. a. 1984], und selbst speziellere in der Radioastronomie und Radio-Spektroskopie schwerer Moleküle [Konopka 1994], in Spannungs-Normalen [Ono u. a. 1995], usw. Bisher sind all diese Anwendungen wegen der oben angeführten Schwierigkeiten nicht praktisch umgesetzt worden. Es wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß für spektroskopische Anwendungen eine abgestrahlte Leistung von 0.1 – 1 mW bei kontinuierlicher Durchstimmbarkeit erforderlich ist. Und eben dies ist bisher nicht gelungen [Konopka u. a. 1994].

In der US-PS 3,725,213 wird ein supraleitendes Barriere-Bauelement und seine Herstellungstechnologie beschrieben, das neben anderen Zielstellungen auch als Generator und Detektor für Millimeterwellen- und Submillimeterwellen-Strahlung geeignet ist und sich auf eine granulare Struktur des supraleitenden Materials stützt. Während eine höhere Strahlungsleistung bzw. Empfindlichkeit durch die Summation von vielen Josephson-Kontakten zwischen Kristallkörnern zustande kommen soll, bestehen wenig Möglichkeiten für eine reproduzierbare Fertigung, elektronische Steuerung, Phasensynchronisation und Impedanzanpassung an das Vakuum. Dieses Bauelement kann über ein stromimpuls-induziertes Magnetfeld zwischen den beiden Zuständen normalleitend und supraleitend geschaltet werden, jedoch wird eine Steuerung der emittierten Strahlungsfrequenz über das magnetfeldabhängige Energiegap nicht versucht.

Ein supraleitendes Bauelement wird in der US-PS 4,837,604 beschrieben, das vertikale Stapelfolgen von Josephson-Kontakten und eine serielle Zusammenschaltung von Stapelfolgen anwendet. Es ist als Schalter mit 3 elektrischen Kontakten ausgebildet und soll einfache Josephson-Kontakte bzw. laterale Anordnungen solcher Kontakte in analogen und digitalen Schaltanordnungen ablösen. Strahlungsemission ist keine Zielstellung für das Bauelement, noch wurde seine technische Auslegung eine solche Zielstellung erlauben.

In der US-PS 5,114,912 wird ein Hochfrequenz-Oszillator beschrieben, der sich auf eine in der Fläche liegende Anordnung von Josephson-Kontakten gründet. Er wird über eine Gleichstromquelle angeregt, und die Frequenz kann über diesen Gleichstrom durchgestimmt werden. Impedanzanpassung kann über die Wahl der Anzahl von Josephson-Kontakten in der flächigen Anordnung, bzw. durch Anschluß entsprechender Shunt-Widerstände erreicht werden. Als Anwendung wird ein durchstimmbarer Gleichstrom-Wechselstrom-Konverter im GHz-Gebiet und selbst bis zu THz-Frequenzen angegeben.

Ein Nachteil dieses Bauelements ist seine ausdrückliche Beschränkung auf eine 2-dimensionale flächige Anordnung von nebeneinander liegenden Josephson-Kontakten auf einem Chip. Eine solche Geometrie impliziert eine strenge Limitierung der maximal möglichen Zahl von Josephson-Kontakten. Namentlich liegt die minimale Fläche eines einzelnen Kontaktes wegen der begrenzten Leistungsfähigkeit der Photolithographie bei etwa  $1 \mu\text{m}^2$ . Die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit sind hoch, es wird ein beachtlicher kritischer Strom benötigt (nicht weniger als 1 mA für optimale Leistung), der zudem über Leitungen mit niedrigem Kontaktwiderstand zuzuführen ist. Andererseits beschränkt die Forderung zur Phasensynchronisation die Längsausdehnung des Bauelements auf etwa  $\lambda/4$ , ein Wert, der für eine Frequenz von 1 THz bei etwa 75 nm liegt. Läßt

man geringfügige Abstände zwischen den Kontakten zu, dann kann man maximal mit ein- bis zweitausend solcher Einzelelemente rechnen. In der Praxis wurden Anordnungen von  $10 \times 10 = 100$  Kontakten realisiert. Wie bereits erläutert, liefert ein solches Bauelemente-Design nicht die für interessante Anwendungen erforderliche Minimalleistung von 0.1 – 1 mW. Es soll dargelegt werden, daß die erfindungsgemäß vorgeschlagenen alternative Designs eine wesentlich höhere Packungsdichte von Josephson-Kontakten erlauben mit der Aussicht auf eine wesentlich höhere emittierte Leistung und damit auf eine Vielzahl neuer Anwendungen, die mit flächigen (planaren) Anordnungen, wie dort dargestellt, nicht möglich sind.

In der EP 446146 wird ein Dreischicht-Josephson-Kontakt beschrieben, der zu beiden Seiten supraleitende Elektroden aufweist, die aus  $\text{LyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  bestehen ( $\text{Ly}$  ist Y oder ein Seltenes Erdmetall,  $6 < y \leq 7$ ). Die nicht supraleitende Barriere besteht hier aus  $\text{Bi}_2\text{Y}_x\text{Sr}_y\text{Cu}_z\text{O}_w$ ,  $0 \leq x \leq 2$ ,  $1 \leq y \leq 3$ ,  $1 \leq z \leq 3$  und  $6 \leq w \leq 13$ . Es fehlen jedoch Angaben zu den Eigenschaften des Bauelements (wie z. B.  $I_c$ ,  $R_n$ , I-V-Kennlinie, Mikrowellenmodulation) oder zur Darstellung von lateralen oder vertikalen Stapelstrukturen und deren möglicher Anwendungen.

Ein magnetischer Steuerungsmodus für die emittierte oder detektierte Strahlungsfrequenz wird in der EP 513,557 beschrieben, wo das erfindungsgemäße Bauelement aus vertikalen Stapelfolgen von Josephson-Kontakten besteht, die zudem seitlich aufgebrachte galvanische Anschlüsse aufweisen. Zwischen jedem Paar von benachbarten Supraleiter/Barriere/Supraleiter-Strukturen (SIS-Strukturen) ist eine weitere supraleitende Schicht vorgesehen, die durch eine Isolatorschicht beidseitig von dem benachbarten Josephson-Kontakt getrennt ist. Diese Schicht soll zur Steuerung der Einzelbauelemente dienen. Indem man einen Strom über seitliche Kontakte durch diese Steuerschicht leitet (siehe auch US-PS 3,725,213), soll ein Magnetfeld erzeugt werden, das das Energie-Gap des Josephson-Kontaktes beeinflußt.

Dieses Bauelement hat mehrere Nachteile, die seine praktische Realisierung im Rahmen der gegenwärtig bekannten Werkstoffeigenschaften und verfügbaren Mikrofabrikations-Technologien unmöglich machen. Insbesondere erfordert (i) seine Herstellung die Abscheidung supraleitender Kontakte von etwa  $0.01 \mu\text{m}$  Breite über isolierenden Schichten an zwei gegenüberliegenden Seitenflächen von senkrecht dazu gewachsenen Stapelstrukturen mit Josephson-Kontakten. Dafür ist gegenwärtig keine Technologie verfügbar. Es sind des weiteren (ii) keine Supraleiter bekannt, die solch große Ströme zur Erzeugung der erforderlichen hohen Magnetfeldstärken aushalten können, die man zur Verringerung des Energiegaps in Hochtemperatur-Supraleitern in den Grenzen der erforderlichen geometrischen Bauelementeabmessungen benötigen würde. Selbst unter der Annahme, daß dies irgendwie möglich wäre, wurde (iii) das Magnetfeld einer bestimmten Steuerschicht mehr als nur einen Josephson-Kontakt beeinflussen, zu unerwünschtem "cross-talk" zwischen mehreren Josephson-Kontakten führen und die Patentabsicht vereiteln. Schließlich wäre (iv) die abgestrahlte Leistung zu gering für viele Anwendungen, da eine Schaltkreis-Optimierung der Josephson-Kontakte zur Impedanzanpassung an den Außenraum nicht vorgesehen ist.

## 2. Natürliche Stapelfolgen von Josephson-Kontakten in Kupferoxid-Supraleitern

In der allerersten Veröffentlichung zu Kupferoxid-Supraleitern äußerten J.G. Bednorz und K.A. Müller 1986 die Meinung, daß La-Ba-Cu-O infolge seiner ausgeprägten Schichtstruktur ein quasi zweidimensionaler Supraleiter ist. In der Folgezeit wurde diese Hypothese durch eine große Zahl experimenteller Ergebnisse in verschiedenen Cuprat-Supraleitern bestätigt [z. B. Bozovic 1991], wobei ein direkter Beweis in der Beobachtung der Supraleitung in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ -Schichten von der Dicke einer Einheitszelle liegt [Bozovic u. a. 1994]. Des weiteren ist der kritische Strom entlang der c-Achse (d. h. senkrecht zu den  $\text{CuO}_2$ -Schichten) viel kleiner als in Richtung parallel zu den  $\text{CuO}_2$ -Ebenen. Er ist nicht Null, d. h., es kann durchaus ein Suprastrom in Richtung der c-Achse fließen. Das impliziert jedoch die Eigenschaft, daß die planaren 2-dimensionalen supraleitenden Stäbchen über Josephson-Tunneln schwach gekoppelt sind.

In anderen Worten gesagt, kann man Cuprat-Supraleiter als natürliche (intrinsische) Stapelfolgen von Josephson-Kontakten mit einem Abstand von 6 ... 25 Å auffassen. Ein theoretisches Modell für eine Stapelfolge von Josephson-gekoppelten supraleitenden Schichten wurde bereits vor 25 Jahren veröffentlicht [von Lawrence und Doniach 1971], und seitdem umfangreich untersucht. Die Vorhersagen des Modells betreffen eine nichtlineare Strom-Spannungs-(I-V)-Kennlinie, mikrowellenstrahlungsinduzierte I-V Stufen (Shapiro-Stufen), und die Mikrowellenemission durch Anlegen von Gleichspannung.

Tatsächlich wurden all diese Eigenschaften in Cuprat-Supraleitern beobachtet, zuerst in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  [Kleiner u. a. 19921 und danach auch in  $(\text{Pb}_y\text{Bi}_{1-y})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ,  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , usw. [Kleiner und Müller 1994; Müller 1994, 1996, sowie durch weitere Gruppen, Régi u. a. 1994, Irie u. a. 1994, Schmidl u. a. 1995, Yasuda u. a. 1996, Tanabe u. a. 1996, Yurgens u. a. 1996, Seidel u. a. 1996, Xiao u. a. 1996]. Die meisten dieser Ergebnisse wurden in kleinen Einkristallen gefunden, jedoch wurden auch Mesa-Strukturen aus Einkristallen oder dünnen Schichten geätzt [Schlenga u. a. 1995]. In einigen Fällen wurde Phasensynchronisation von mehr als 1000 Josephson-Kontakten erzielt [Schlenga u. a. 1995], im allgemeinen jedoch nur partiell erreicht, wie das die Vielzahl von Zweigen in den I-V-Kennlinien (in allen bisherigen Arbeiten) zeigt. Namentlich dann, wenn die zu einem Stapel gehörenden Josephson-Kontakte nicht alle identisch sind, d. h., wenn ihr kritischer Strom von Kontakt zu Kontakt verschieden ist, fallen sie nicht im selben Punkt der Kennlinie in den normalleitenden Zustand zurück, sobald der Stromdurchfluß erhöht wird. Als Folge davon muß sich die Strahlungsemission als Überlagerung kohärenter (schmalbandiger) Strahlung ergeben, was auch beobachtet wurde [Schlenga u. a. 1995, Müller 1996]. Diese Unterschiede in den Eigenschaften der Josephson-Kontakte rühren von nicht perfektem Kristallwachstum und dem Lithographie-Prozess zur Definition der Mesa-Strukturen her, was auch zu Unterschieden in der Querschnittsfläche der Mesa-Strukturen führt. Die bisher gemessene höchste Frequenz emittierter Strahlung liegt bei  $\nu = 95$  GHz, was allerdings die Folge unzureichender Labor-Nachweisteknik ist [Müller 1996].

Es wurde bisher über keine praktisch nutzbaren Bauelemente oder Anwendungen berichtet, obwohl es Hin-

weise zum Einsatz möglicher zukünftiger Emittoren von Submillimeter-Strahlung hinreichend gibt [Schlenga 1995].

Wenngleich solche Mesa-Strukturen in dünnen Cuprat-Schichten nichtlineare I-U Kennlinien mit zahlreichen Zweigen und Schalten zwischen den Zweigen, Hysterese, sowie auch durch Mikrowellenstrahlung hervorgerufene Shapiro-Stufen, und selbst Mikrowellen-Emission zeigten, bleiben die I-V-Kennlinien und andere Eigenschaften dieser Mesa-Strukturen weit hinter denjenigen idealer phasensynchronisierter Stapelfolgen von Josephson-Kontakten zurück. Insbesondere liegt die emittierte Mikrowellenleistung nur im pW-Gebiet, was gleichbedeutend damit ist, daß solche Stapelfolgen für praktische Anwendungen uninteressant sind.

Dafür sind 3 Hauptgründe verantwortlich: (a) Die Josephson-Kontakte waren nicht uniform bezüglich ihrer Werte von  $I_c$  und  $R_N$ ; (b) Die Flächen der Josephson-Kontakte waren im allgemeinen zu groß, typischerweise etwa  $30 \times 3 \mu\text{m}^2 \approx 10^{-5}$ ; und (c). Die Bauelemente waren nicht optimiert bezüglich ihrer Impedanzanpassung an den freien Raum. Infolge von (a) und (b) ist die Phasensynchronisation nicht perfekt, instabil und zufällig. Natürliche Josephson-Kontakte in Cuprat-Supraleitern weisen relativ große kritische Stromdichten in c-Achsen-Richtung auf ( $10^4 - 10^6$  A/cm<sup>2</sup>), so daß solche Kontakte bei weitem zu große kritische Ströme haben, 100 mA und darüber. Große Josephson-Kontakte zeigen viele komplexe Anregungsmoden, Supraströme, die in beiden Richtungen fließen, Fluxon-Bewegung, usw. Obwohl diese Probleme bekannt sind, waren die Wissenschaftler der genannten Gruppen nicht in der Lage, die Kontaktfläche wegen zu hoher elektrischer Widerstände wesentlich zu reduzieren. Zu große elektrische Kontaktwiderstände bewirken eine deutliche Aufheizung der Stapelfolgen, wodurch die Phasensynchronisation erschwert wird und die kritischen Ströme inhomogen werden. In extremen Fällen brennen die Josephson-Kontakte durch.

## 3. Dünne Schichten aus Hochtemperatur-Supraleitern mit a-Achsen Orientierung

Eine aktuelle Entwicklung, die zur praktischen Umsetzung in ein neuartiges Bauelement geeignet ist, besteht in einer Technologie zur Züchtung dünner Hochtemperatur-Cuprat-Supraleiter, in denen die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen nicht parallel zum Substrat angeordnet sind. Diese können tatsächlich durchweg senkrecht zum Substrat stehen, und wir wollen eine solche Dünnschicht als "a-Achsen" orientierte Schicht bezeichnen. Dieser Name ist abgeleitet von dem spezifischen Fall, daß die einkristalline Schicht in einer solchen epitaxialen Beziehung zum Substrat gezüchtet wird, daß die a-Achse senkrecht zur Oberfläche des Substrats steht. Wir wollen diesen Fall nicht von demjenigen unterscheiden, daß die b-Achse (in orthorhombischen Kristallen mit  $a \neq b$ ) senkrecht auf dem Substrat steht, sowie auch wenn die a-Achse willkürlich geneigt ist, solange nur die c-Achse parallel zur Substratoberfläche verläuft, d. h. also, solange die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen senkrecht auf der Substratoberfläche stehen.

Unter Verwendung einer ähnlichen üblicherweise akzeptierten (obgleich ungenauen) Terminologie werden wir die ganze Gruppe epitaxialer Orientierungen, bei denen die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen einen von  $90^\circ$  oder  $0^\circ$  verschiedenen Winkel zum Substrat annehmen, in dem Begriff "geneigte a-Achsen"-Schicht zusammenfassen. Eine fei-

nerer Unterscheidung und eine genauere Beschreibung ist durchaus möglich, beispielsweise unter Verwendung des Konzepts der Millerschen Indizes von Substrat-Oberfläche (auf der die dünne Schicht abzuscheiden ist) und Dünnschicht-Oberfläche. Das allerdings ist für die hier geführte Diskussion nicht erforderlich.

Die bei weitem größte Gruppe erzeugt und qualitativ hochwertiger Dünnschichten von Hochtemperatur-Supraleitern haben die c-Achsen-Orientierung (d. h. bei ihnen stehen die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen parallel zur Substrat-oberfläche). Ursache hierfür ist die starke Anisotropie physikalischer Eigenschaften von geschichteten Cupraten, einschließlich der Wachstumsraten in unterschiedlichen kristallographischen Richtungen. Trotzdem gibt es beachtliche Bemühungen, die auf die Züchtung von "a-Achsen"-orientierten und "geneigten a-Achsen"-Schichten gerichtet sind, wobei das Hauptmotiv daher rührt, die wesentlich größere Kohärenzlänge in Richtung der a-Achse für Dreischicht-Josephson-Kontakte auszunutzen. Im folgenden werden einige der erfolgreichsten Züchtungsexperimente dieser Art referiert.

Es wurden bereits dünne  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ -Schichten mit um  $45^\circ$  geneigten  $\text{CuO}_2$ -Ebenen mittels Magnetron-Sputtertechnik auf  $\text{SrTiO}_3$ -Substraten abgeschieden, die mit einem Winkel von  $5^\circ$  von der (110)-Richtung abweichen. Ebenso kamen  $\text{MgO}$ -Substrate mit der gleichen Charakteristik und zusätzlichen Pufferschichten zur Anwendung [Tanimura u. a. 1993]. Die gewünschte geneigte a-Achsen-Orientierung wurde mittels RHEED (Beugung hochenergetischer Elektronen in Reflexionslage) und TEM (Transmissions-Elektronenmikroskopie) in Querschnittsabbildung sowie durch die Messung von Transporteigenschaften nachgewiesen.

Im wesentlichen vollständig a-Achsen-orientierte  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Schichten wurden auf (100)-orientierten  $\text{LaSrCaO}_4$ -Substraten mit einer  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Pufferschicht mittels Einzeltarget-Sputtern erhalten [Suzuki u. a. 1993]. Ähnlich orientierte Filme aus  $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_2-x\text{Cu}_3\text{O}_7-d$  wurden direkt auf (100)-orientierte  $\text{SrTiO}_3$  Substrate mittels Laser-Aufdampftechnik gebracht, wobei im wesentlichen besondere Sorgfalt auf die richtige Einstellung der Wachstumsparameter gerichtet war [Badaye u. a. 1995].

Diese Beispiele beweisen, daß es technisch möglich ist, "a-Achsen"-orientierte und "geneigte a-Achsen"-Schichten hoher Qualität aus Cuprat-Supraleitern herzustellen. Eine Verkörperung der Erfindung stützt sich auf den obigen Sachverhalt.

#### Ziel der Erfindung

Es ist Ziel der vorliegenden Erfindung, Mittel bereitzustellen, die die oben diskutierten Nachteile und Schwierigkeiten bekannter Lösungen zu umgehen gestatten und ein Bauelement zu entwickeln, das die diskutierten Nachteile vermeidet.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter und Detektor für elektromagnetische Strahlung im Submillimeterwellen-Gebiet verfügbar zu machen, der gleichzeitig eine Vielzahl von Stapelfolgen von Josephson-Kontakten in einer flächigen (2-dimensionalen) Anordnung anwendet, so daß die Erzeugung von Mikrowellenleistung oder die Empfindlichkeit zum Nachweis von Mikrowellenstrahlung beträchtlich erhöht wird.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter im Submil-

limeterwellen-Gebiet mit einer solchen Impedanz verfügbar zu machen, daß Impedanzanpassung an den die Strahlung aufnehmenden Raum erzielt wird, wodurch die abgestrahlte Leistung maximale Werte annimmt.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter im Submillimeterwellen-Gebiet verfügbar zu machen, der eine sehr geringe Emissionslinienbreite (weniger als den millionsten Teil der Strahlungsfrequenz) innerhalb seines bis zu einigen THz reichenden Submillimeterwellen-Bandes aufweist.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter und -detektor im Submillimeterwellen-Gebiet mit einer elektronischen Steuerung zur kontinuierlichen Veränderung der Emissionsfrequenz bzw. der Detektionsfrequenz über einen breiten spektralen Bereich zu schaffen.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter und -detektor im Submillimeterwellen-Gebiet zu schaffen, dessen emittierte Mikrowellenstrahlung elektronisch moduliert bzw. aus- und eingeschaltet werden kann, was auch einem schnellen elektronischen Schalter für Supraleitungselektroniken entspricht.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung einen neuartigen Strahlungsemitter und -detektor im Submillimeterwellen-Gebiet zu schaffen, der die Funktionen Emission und Detektion unabhängig voneinander, in Kanälen mit verschiedenen Frequenzen oder elektrisch variablen und gesteuerten Frequenzen ermöglicht.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter und -detektor im Submillimeterwellen-Gebiet zu schaffen, der eine Inversion des Emissions- und Detektionsmodus mit externen elektronischen Mitteln erlaubt.

Es ist eine weitere Zielstellung der vorliegenden Erfindung, einen neuartigen Strahlungsemitter und -detektor im Submillimeterwellen-Gebiet zu schaffen, der für eine Einbeziehung in Supraleiter/Halbleiter-Hybrid-schaltungen geeignet ist.

#### Darlegung des Wesens der Erfindung

Diese Zielstellungen werden mit der vorliegenden Erfindung eines zweidimensionalen Netzwerks von supraleitenden Mikrobrücken mit Stapelfolgen von (nativen) Josephson-Kontakten erreicht, wobei Teile des Netzwerks in vorbestimmter Weise gruppiert und (seriell, parallel) zusammengeschaltet, sowie über Kontakte mit einer externen elektronischen Steuerungseinheit betrieben werden können. Im besonderen wird die Aufgabe durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 und Anspruchs 13 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Anwendungen der Erfindung geben die Ansprüche 2 bis 12 und 14 bis 19 an.

#### Ausführungsbeispiel

Die Erfindung soll anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. In der zugehörigen Zeichnung zeigt:

Fig. 1 Eine Einheitszelle des Kristalls eines Hochtemperatur-Supraleiters, die eine  $\text{CuO}_2$ -Ebene enthält,

Fig. 2 Eine "a-Achsen"-orientierte Schicht eines Hochtemperatur-Supraleiters. Die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen stehen senkrecht auf dem Substrat.

Fig. 3 Eine dünne Schicht eines Hochtemperatur-Su-

praleiters mit "geneigter a-Achse". Die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen sind mit einem Winkel  $\Theta$  gegenüber dem Substrat geneigt.

Fig. 4.A Eine Mikrobrücke, die aus einem Hochtemperatur-Supraleiter mit "a-Achsen"-orientierter Wachstumsrichtung hergestellt wurde.

Fig. 4.B Einen Äquivalentschaltkreis für das in Fig. 4.A gezeigte Bauelement: Eine einfache, lineare (serielle) Anordnung von Josephson-Übergängen.

Fig. 5 Eine Mikrobrücke, die aus einem Hochtemperatur-Supraleiter mit "geneigter a-Achsen"-Wachstumsrichtung hergestellt wurde. Der Äquivalentschaltkreis entspricht dem aus Fig. 4.B.

Fig. 6.A Eine parallele Anordnung von Mikrobrücken, die jeweils Stapelfolgen natürlicher Josephson-Kontakte enthalten, hergestellt aus einer epitaxialen "a-Achsen"- bzw. "geneigten a-Achsen"-Schicht durch chemisches oder Ionen-Ätzen von Gräben, die die Mikrobrücken gegeneinander elektrisch isolieren.

Fig. 6.B Einen Äquivalentschaltkreis für das Bauelement aus Fig. 6.A Parallelschaltung von zwei linearen Stapelfolgen von Josephson-Kontakten.

Fig. 7.A Eine Parallel-Schaltung von drei identischen Gruppen (cluster) mit jeweils 10 Mikrobrücken

Fig. 7.B Einen Äquivalentschaltkreis für das Bauelement aus Fig. 7.A

Fig. 8 Eine Anordnung mehrerer Gruppen von Mikrobrücken, die jeweils Stapelfolgen von Josephson-Kontakten enthalten, entlang einer Streifenleitung. Die Entfernung zwischen den einzelnen Segmenten von zusammengefaßten Emittlern entspricht der Wellenlänge  $\lambda$  der elektromagnetischen Strahlung innerhalb der Struktur.

Fig. 9 Einen grundsätzlicher Aufbau des erfindungsgemäßen Bauelements, das in einer dünnen supraleitenden Epitaxieschicht eine zweidimensionale laterale Anordnung parallel geschalteter Mikrobrücken (Stege) (a) enthält, die durch bis auf das Substrat reichende Gräben (b) voneinander getrennt sind und damit den Stromfluß durch die Mikrobrücken bzw. Gruppen von Mikrobrücken lenken. Jede Mikrobrücke enthält eine Stapelfolge von Josephson-Kontakten, deren Anordnung in Fig. 2 und Fig. 3 erklärt wird. Die elektrischen Anschlüsse (c) und (d) erlauben eine Verbindung zu einer äußeren Steuerungselektronik (e).

Anhand einer Verkörperung des erfindungsgemäßen Bauelements wird im folgenden die Erfindung näher beschrieben, dessen grundsätzliche Struktureinheit, d. h. die lineare Stapelfolge von Josephson-Kontakten in einer Dünnschicht hoher Qualität eines Hochtemperatur-Supraleiters gebildet wird, wobei sich die dünne Schicht in einer speziellen epitaxialen Beziehung mit dem Substrat befindet.

#### 1. Mikrobrücken in "a-Achsen-orientierten" und "geneigten a-Achsen orientierten" Dünnschichten

Zur Erklärung muß anhand Fig. 1 bemerkt werden, daß die kristallografische Einheitszelle aller bekannten Cuprat-Supraleiter ein verlängertes Parallelepiped mit den Seitenlängen  $a \approx b \approx 3.8 \text{ \AA}$  und  $c > a, b$  darstellt. Zum Beispiel ist  $c \approx 6.5 \text{ \AA}$  in  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ,  $c \approx 11.7 \text{ \AA}$  in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $c \approx 15.4 \text{ \AA}$  in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ , etc. [Genauer gesagt ist die c-Achsen-Periodizität in  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  und  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  doppelt so groß wegen des Vorhandenseins einer Gleitebene, obwohl dieser Sachverhalt für die vorliegende Diskussion wenig Bedeutung hat, ebenso wie diejenige einer leichten orthorhombischen

Verzerrung mit  $a \neq b$  in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ].

Alle Hochtemperatur-Supraleiter, die bisher betrachtet wurden, waren mit der c-Achse senkrecht zum Substrat gezüchtet worden (sie werden zur Abkürzung üblicherweise als "c-Achsen orientierte HTS-Schichten" bezeichnet). Dies ist die häufigste epitaxiale Beziehung, die sich gewöhnlich einstellt, wenn Hochtemperatur-Supraleiter auf gitterangepaßten Substraten, wie z. B. (100)-geschnittenem  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$ , etc. aufgewachsen werden. In diesem Falle verlaufen alle  $\text{CuO}_2$ -Ebenen parallel zur großen Fläche des Substrates.

Werden jedoch speziell geschnittene Substrate verwendet, so ist es möglich, andere epitaxiale Anordnungen zu erzielen, in denen die  $\text{CuO}_2$ -Ebenen senkrecht zur großen Fläche des Substrates verlaufen. In einem solchen Falle ist die a-Achse des Cuprat-Supraleiters (oder völlig gleichbedeutend die b-Achse) senkrecht zur großen Fläche des Substrates angeordnet, wie in Fig. 2 gezeigt ist. Solche Hochtemperatur-Supraleiter-Dünnschichten werden zur Abkürzung als "a-Achsen-orientierte HTS-Schichten" bezeichnet.

Eine Methode, diese Orientierung zu erreichen, besteht im folgenden (hier ist  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  als Beispiel gewählt, wobei  $a \approx 3.8 \text{ \AA}$  und  $c \approx 6.5 \text{ \AA}$  beträgt):

Man wählt das Substrat und seinen "Schnitt" (d. h. die Polier-Richtung oder die Orientierung der Oberflächenebene des Substrats) so aus, daß die Periodizität der Oberflächenebene  $3.8 \text{ \AA} \times 6.5 \text{ \AA}$  beträgt. Dann stellt sich die Möglichkeit ein, daß die Schicht mit ihrer a-Achse senkrecht zum Substrat aufwächst. Ein anderer Gesichtspunkt ist die Zahl "günstiger Kontakte" zwischen Kationen und Anionen von Schicht und Substrat, die auf energetische Beziehungen in der Grenzfläche Einfluß nehmen. Natürlich benötigt man für jeden unterschiedlichen Hochtemperatur-Supraleiter unterschiedliche Substrate oder zumindest Substrat-Schnitte.

Für den vorliegenden Zweck ist es ausreichend festzustellen, daß solche Substrate und Substrat-Schnitte für mehrere Cuprat-Hochtemperatur-Supraleiter bereits entdeckt worden sind, und vollständiges epitaxiales a-Achsen-Wachstum tatsächlich demonstriert wurde, und zwar für  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  und  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  [Suzuki u. a. 1993, Baday u. a. 1995].

Eine weitere Verkörperung der vorliegenden Erfindung wird durch eine mögliche andere epitaxiale Beziehung geliefert, die in Fig. 3 gezeigt ist. Hierfür werden alle  $\text{CuO}_2$ -Ebenen der Cuprat-Filme in einem Winkel zum Substrat gezüchtet, der von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  verschieden ist. Ein solcher Winkel ist abhängig vom Substratschnitt und kann typischerweise  $1^\circ$  bis  $10^\circ$  betragen, obwohl größere oder kleinere Winkel auch möglich sind. Für den Zweck der vorliegenden Diskussion nehmen wir an, daß der Winkel etwa  $5^\circ$  beträgt. Dies erfordert die Existenz von Stufen im Substrat, die  $3.8 \text{ \AA}$  hoch sind und einen Abstand von etwa  $d = 3.8 \times \tan 85^\circ \text{ \AA}$  haben. Epitaxiales Wachstum solcher geneigten a-Achsen-orientierten HTS-Schichten wurde auch schon ausgeführt [Tanimura u. a. 1993, Kataoka u. a. 1993].

Wie bereits ausgeführt, stellen Hochtemperatur-Cuprat-Supraleiter, wie z. B.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ,  $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ,  $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6.2}$ ,  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ , etc. natürliche supraleitende Supergitter vom SIS ... , oder SINIS-Typ dar. Benutzt man eine der genannten Orientierungen der Dünnschicht, dann lassen sich einfache Mikrobrücken der in Fig. 4.A und Fig. 5 gezeigten Art, und somit also eine Stapelfolge von Josephson-Kontakten erzeugen. Solche Stapelfolgen in Mikrobrücken stellen die Grundstruktur für das erfindungsge-



mäße Bauelement dar. Jedoch müssen zur Einstellung einer optimalen Performance des Bauelements mehrere solcher Mikrobrücken in einem supraleitenden Netzwerk zusammengeschaltet werden, wie im weiteren Text beschrieben.

## 2. Zusammenschaltung von Mikrobrücken: Schaltkreis-Optimierung

Es wird zuerst eine einzelne Stapelfolge von Josephson-Kontakten betrachtet. Der maximal erlaubte kritische Strom durch einen einzelnen Kontakt ist etwa  $I_c = 1$  mA. Größere Werte führen zu sehr gestörten Strom-Spannungs-Kennlinien infolge sich einstellender besonderer Flußbedingungen. Der Josephson-Kontakt verhält sich wie ein "langer Kontakt" mit Strömen, die an verschiedenen Orten hin- und herfließen. Mit dem Beispiel von  $I_c R = 10$  mV und  $I_c = 1$  mA erhält man als typischen unteren Grenzwert für den elektrischen Widerstand  $R = 10 \Omega$ . Impedanzanpassung des Bauelements an das Vakuum erfordert einen Gesamtwiderstand  $R_{TOT} = NR \approx 300 \Omega$ . Mit  $R = 10 \Omega$  erhält man also  $N = 30$  als Wert für die Zahl einzubringender Josephson-Kontakte in der Stapelfolge einer Mesa-Struktur. Falls  $I_c$  kleiner wäre als 1 mA, hätte sich ein noch größerer Wert für  $R$  und damit ein kleinerer Wert für  $N$  eingestellt. Demzufolge wäre dieser Wert  $N$  eine untere Grenze für eine einzelne Mesa-Struktur mit Impedanzanpassung an das Vakuum.

Ebenfalls sind die geometrischen Abmessungen des Kontakts mit den genannten Werten schon festgelegt. Falls  $j_c^\perp = 10^4$  A/cm<sup>2</sup> ist, erhält man mit  $I_c = 1$  mA als Fläche des Josephson-Kontaktes

$$A = I_c / j_c = 10^{-3} \text{ A} / 10^4 \text{ A/m}^2 = 10^{-7} \text{ cm}^2 = 10 \text{ } \mu\text{m}^2.$$

Würde man quadratische Josephson-Kontakte benutzen, sollten diese eine Kantenlänge von 3  $\mu\text{m}$  aufweisen.

Dieser Wert von  $j_c^\perp = 10^4$  A/cm<sup>2</sup> betrifft natürliche Josephson-Kontakte in sehr anisotropen Hochtemperatur-Supraleiter-Werkstoffen, wie z. B.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ . Bei weniger anisotropen Hochtemperatur-Supraleiter-Verbindungen kann  $j_c^\perp$  höhere Werte (bis zu  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) annehmen, wodurch man noch kleinere Kontaktquerschnittsflächen erlangen könnte.

Die Ausgangsleistung einer solchen einfachen Stapelfolge ist jedoch recht bescheiden:

$$P_{MAX}^{out} = 1/8 N I_c^2 R = (1/8) \times 30 \times 10^6 \times 10 A^2 \Omega = 5 \times 10^{-4} \text{ mW}.$$

Höhere abgestrahlte Leistungen kann man nur dann erwarten, wenn komplexere Systeme mit in Reihe und parallel geschalteten Gruppen von Mesa-Strukturen zur Anwendung kommen. Im wesentlichen besteht die Idee darin, den Gesamtstrom durch das Bauelement dadurch zu erhöhen, ohne daß  $I_c^{MAX} = 1$  mA für einen einzelnen Kontakt überschritten wird, daß mehrere Stapelfolgen parallel geschaltet werden (Fig. 6). Eine Verringerung des Gesamtwiderstand kann durch eine Erhöhung der Zahl von Josephson-Kontakten in jeder Stapelfolge einfach ausgeglichen werden.

Für eine Parallelschaltung von  $M$  Stapelfolgen, in denen jede davon  $N$  Josephson-Kontakte in Serienschaltung enthält, stellt sich als Gesamtwiderstand  $R_{TOT} = (N/M)R$  ein; Für  $R_{TOT} = 300 \Omega$  und  $R = 10 \Omega$  erhält man also  $N/M = 30$  oder  $N = 30M$ .

Der Gesamtstrom wird  $I = M I_c$ , so daß die Gesamt-

leistung

$$P_{TOT}^{out} = (1/8) \times 10^{-6} \times 300 \times M^2 A^2 \Omega \approx 0.4 \times M^2 \text{ mW}$$

entsteht.

Man sieht damit, daß die gesamte abgestrahlte Leistung zu  $M^2$  proportional ist, und es könnte scheinen, als wäre die Leistung beliebig steuerbar. Jedoch werden Beschränkungen durch die maximal mögliche Größe des Netzwerks und natürlich der noch akzeptablen Dimensionen der einzelnen Stapelfolgen auferlegt.

Namentlich für eine gruppierte Anordnung von Josephson-Kontakten kann Phasensynchronisation nur über eine Entfernung von näherungsweise  $\lambda/4$  erreicht werden, wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der emittierten elektromagnetischen Strahlung ist. Wäre die gewünschte abgestrahlte Frequenz  $\nu = 3$  THz, dann beträgt  $\lambda = 100 \mu\text{m}$ ; für  $\nu = 1$  THz, erhält man  $\lambda = 300 \mu\text{m}$ .

Zur Optimierung von Bauelementparametern (z. B., um Impedanzanpassung an das Vakuum und eine Reduzierung der inneren Reflexion von elektromagnetischer Strahlung an der Kristall/Vakuum-Grenzfläche zu erreichen) ist es wünschenswert, Mikrobrücken in jeder gewollten Art elektrisch zu kombinieren. Dabei sollten allerdings die elektrischen Verbindungen aus Supraleitern bestehen und nicht zur Herausbildung von "weak-links" (schwachen Kopplungen) führen, die dann als Josephson-Kontakte in Reihenschaltung mit der Stapelfolge von Josephson-Kontakten in der Mesa-Struktur wirken. Mit anderen Worten gesagt, es sind Hochtemperatur-Supraleiter-Elektroden von der gleichen Art supraleitenden Werkstoffes erforderlich.

Sowohl Serien- als auch Parallel-Schaltung von Mesa-Strukturen ist in praktisch relevanten Fällen erforderlich. Im folgenden Abschnitt soll eine Methode erklärt werden, mit der die Serienschaltung einfacher Mikrobrücken oder von Gruppen (cluster) von Mikrobrücken erreicht wird, die bereits als Parallelschaltung vorliegen. Des weiteren werden realistische Abschätzungen zur maximal möglichen Zahl phasenstarrer Josephson-Kontakte in solchen Stapelfolgen und Netzwerken angegeben.

## 3. Beispiel

Eine Analyse der realistischen Grenzen linearer Stapelfolgen und deren paralleler und serieller Zusammenschaltung erfolgt in der folgenden Weise: Nehmen wir  $I_c R \approx 25$  mV und  $I_c^{MAX} = 1$  mA als gegeben an, dann ist  $R = 25 \Omega$  der Widerstand eines Josephson-Kontaktes. Damit ist  $N$  auf Werte von 10–15 beschränkt, wenn Impedanzanpassung an das Vakuum mit  $R_{TOT} = NR \approx 300 \Omega$  angestrebt wird. Das ist offensichtlich nicht sehr günstig für eine reine a-Achsenorientierte HTS-Schicht, (Fig. 2, Fig. 4.A), da in einem solchen Fall die Länge der Mikrobrücken (in a-Achsen-Schichten wird die Bezeichnung "Mikrobrücke" für die vordem bezeichnete "Mesa-Struktur" in c-Achsen-Schichten gewählt). Weniger als  $15 \times 20 \text{ } \text{\AA} = 300 \text{ } \text{\AA}$  betragen würde, was für gängige lithografische Verfahren zu klein ist.

Die Situation verbessert sich für geneigte a-Achsen orientierte HTS-Schichten (Fig. 3, Fig. 5), wo der Neigungswinkel relativ klein (etwa  $5^\circ$ ) ist. Hier bekommt man für  $N = 15$  und  $c = 15 \text{ } \text{\AA}$  eine Gesamtlänge  $L$  der Mikrobrücke von  $d/\tan\theta$ , wobei  $d$  die Schichtdicke ist. Für  $d = 1000 \text{ } \text{\AA}$  und  $\theta = 5^\circ$  erhält man also  $L \approx 10,000 \text{ } \text{\AA} = 1 \mu\text{m}$ , was einem vernünftigen Wert für gegenwärtig übliche Lithographie-Verfahren darstellt. Und diese

Länge kann mit wachsender Schichtdicken weiter vergrößert werden.

Wir haben jedoch auch die erforderlichen seitlichen (lateralen) Dimensionen zu untersuchen. Beschränkungen kommen hier von der Stromdichte  $j_c$ . Eine typische Stromdichte für c-Achsen orientierte Schichten liegt bei  $j_c = 10^4$  A/cm<sup>2</sup>. Mit einem erwünschten kritischen Strom von  $I_c = 1$  mA erhält man die schon genannte Kontaktfläche  $A = I_c/j_c = 10^{-3}/10^4$  cm<sup>2</sup> =  $10 \mu\text{m}^2$ . Es ist jedoch zu beachten, daß die effektive Breite jetzt gleich der Schichtdicke dividiert durch den Tangens des Neigungswinkels ist, d. h.  $d/\tan\theta$ . Mit  $d = 1.000 \text{ \AA}$  und  $\theta = 5^\circ$  erhält man  $d/\tan\theta \approx 1 \mu\text{m}$ . Dies bedeutet, daß die Breite der Mikrobrücken  $1 \mu\text{m}$  betragen soll, was sicherlich zu erreichen ist.

Allerdings wird eine solche Mikrobrücke, die eine Stapelfolge von Josephson-Kontakten enthält, nur eine relativ kleine Leistung emittierter Strahlung erzeugen, nämlich  $P_{\text{out}} = (1/8)I_c^2 R_{\text{TOT}} = (1/8)(10^{-3})^2 300 \text{ W} \approx 0.4 \text{ mW}$ .

Um diese Leistung zu erhöhen, benötigt man erneut eine Parallelschaltung von  $M$  solcher Mikrobrücken, da in diesem Fall  $P_{\text{out}} = (1/8)(MI_c)^2 R_{\text{TOT}} = M^2 \times 0.4 \text{ mW}$  beträgt, vorausgesetzt, daß die Zahl  $N$  der natürlichen Josephson-Kontakte in jeder Mikrobrücke so eingestellt wird, daß die Impedanzanpassung an das Vakuum erfüllt bleibt. Für  $R_{\text{TOT}} = R N/M \approx 300$  und  $R = 15-30 \Omega$  erhalten wir  $N/M \approx 10-20$ , oder typischerweise  $N = 15 M$ .

Dies liefert den Ansatzpunkt, um ein sehr einfaches Bauelement zu schaffen, das in Fig. 8 gezeigt ist und aus einer parallelen Anordnung von  $M$  identischen Mikrobrücken besteht. Diese werden dadurch gebildet, daß ganz einfach eine Folge äquidistanter Gräben durch chemisches oder Ionen-Ätzen bis herab an das Substrat erzeugt wird.

Für  $N = 15 M$  erhält man um das  $M$ -fache verlängerte Mikrobrücken. Ein reiner a-Achsenorientierter HTS-Film führt auf eine Mikrobrückenlänge von  $15 \times 300 \text{ \AA} = 4.500 \text{ \AA}$  oder  $0.45 \mu\text{m}$ , was noch immer ein sehr kleiner Wert und technologisch schwierig herstellbar ist. Hingegen wird die Länge der Mikrobrücken in geneigten a-Achsen-orientierten HTS-Schichten für  $d = 1.000 \text{ \AA}$ ,  $N = 300$  und  $\theta = 5^\circ$  etwa  $M \mu\text{m}$  betragen.

Oben hatten wir bereits geschlußfolgert, daß für  $j_c = 10^4$  A/cm<sup>2</sup> und  $I_c = 1$  mA die Kontaktfläche  $A = 10 \mu\text{m}^2$  und die Mikrobrücken-Breite etwa  $10 \mu\text{m}$  (unsere Standardwahl  $d = 1.000 \text{ \AA}$  und  $\theta = 5^\circ$ ) beträgt. Damit ist  $M$  stark eingeschränkt, da die gesamte Breite des Bauelements für eine Emissionsfrequenz von  $\nu = 3 \text{ THz}$  ( $\lambda = 100 \mu\text{m}$ ) also  $25 \mu\text{m}$ , und für  $\nu = 1 \text{ THz}$  ( $\lambda = 300 \mu\text{m}$ )  $75 \mu\text{m}$  betragen kann. Folglich erhält man für  $M = 3-7$ , was einer recht beträchtlichen Ausgangsleistung von  $P_{\text{out}} = 1-20 \text{ mW}$  entspräche.

Weitere Verbesserungen in der Emissionsleistung könnte man dadurch erhalten, daß man weniger anisotrope Hochtemperatur-Supraleiter mit einer höheren kritischen Stromdichte für die c-Achsen-Richtung wählt. Beispielsweise beträgt für  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $j_c \approx 10^6$  A/cm<sup>2</sup> in c-Achsen-Richtung. In einem solchen Falle hätte man viel kleinere Kontaktflächen vorzusehen, sagen wir  $0.1-1 \mu\text{m}^2$ , was wesentlich schmalere Gräben, eine vergrößerte Zahl von Mikrobrücken und damit eine höhere Emissionsleistung bewirkt. Eine praktische Grenze für die Breite von Mikrobrücken könnte bei  $1 \mu\text{m}$  liegen mit sehr schmalen Gräben dazwischen. Das würde bei  $3 \text{ THz}$  auf Werte für  $M$  von etwa  $25$  und die doch erhebliche Ausgangsleistung von etwa  $P \approx 240 \text{ mW}$  führen.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung steckt in der sehr geringen Länge von Mikrobrücken ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ) für a-Achsen-orientierte HTS-Schichten. Man könnte ein Bauelement entsprechend der Fig. 7 entwerfen. Unter Verwendung der verfügbaren Bauelementlänge von  $25 \mu\text{m}$  (für  $3 \text{ THz}$ ) wurden in dieser Fig. 7 drei parallele Segmente (Streifen) von jeweils  $10$  parallelen Mikrobrücken zusammengeschaltet. Die supraleitende elektrische Verbindung zwischen den  $3$  Segmenten ist parallel. Man verfügt folglich über einen Gesamtwert  $M$  von Mikrobrücken, der sich aus der Zahl der Mikrobrücken pro Segment multipliziert mit der Zahl der Segmente ergibt. Realistische Werte können bis zu  $25$  Mikrobrücken pro Segment und bis zu  $10$  Segmenten gehen, was einem  $M = 250$  entspräche. Unter idealen Bedingungen entstände hierbei eine immense Emissionsleistung von

$$P = (250)^2 0.4 \text{ mW} = 25 \text{ W!}$$

Obwohl der bisherige Wert für die Ausgangsleistung sicher wegen einer Anzahl anderer begrenzender Faktoren eine zu hohe Schätzung darstellt, so wird doch das Potential sichtbar, das in einem solchen Bauelement stecken könnte. Beachtenswert ist auch die Einfachheit der Herstellung, die einen einzigen lithografischen Prozeßschritt ohne jegliche besondere Ausrichtungsanforderung erfordert.

Wegen der größeren Breite der Materialstreifen senkrecht zu den Mikrobrücken kann hier auch ein höherer Strom fließen als in einem einzelnen Segment von Mikrobrücken. Der Strom fließt in diesen Streifen entlang der  $\text{CuO}_2$ -Ebenen, was der "einfachen" (d. h. leitfähigeren) Richtung entspricht;  $j_c$  kann in dieser Richtung (parallel zur a-Achse)  $10-1000$  mal höher sein als in der "harten" (d. h. c-Achsen-) Richtung entlang derer der Strom durch die Mikrobrücken fließt. Auf diese Weise werden "weak links" zwischen diesen Kontaktbahnen und den Mikrobrücken vermieden.

Schließlich ist zu bemerken, daß die elektrische Verbindung zur externen Elektronik über dicke ( $0.5-1 \mu\text{m}$ ) und großflächige ( $1 \text{ mm}^2$ ) normalleitende Metall-Kontakte (Gold, Silber, etc.) erfolgt, die auf der supraleitenden Schicht abgeschieden wurden. Eine Aufheizung des Bauelements durch resistives Verhalten dieser Kontakte wird dadurch beträchtlich minimiert. Anbunden externer Verbindungen ist einfach.

Die hier diskutierte Verkörperung des erfindungsgemäßigen Bauelements verfügt über den zusätzlichen Vorteil, daß die Josephson-Kontakte eine sehr kleine Querschnittsfläche und damit eine sehr kleine elektrische Kapazität  $C$  aufweisen. Ein reiner a-Achsen-orientierter  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Film mit einer kritischen Stromstärke in c-Richtung von  $j_c = 10^6$  A/cm<sup>2</sup> weist bei einem optimalen Strom eine Querschnittsfläche von  $A = 10^{-9} \text{ cm}^2 = 0.1 \mu\text{m}^2$  auf. Dies entspricht auch genau einer Schichtdicke von  $1.000 \text{ \AA}$  und der Mikrobrücken-Breite von  $1 \mu\text{m}$ , so wie oben bereits beschrieben.

Aus den bekannten Materialeigenschaften für Cuprate und für isolierende Schichten kann man eine Kapazität von  $C \approx 5 \times 10^{-15} \text{ F}$  in solch kleinen Kontakten erwarten. [Die spezifische Kapazität von  $\text{Nb/NbO}_x/\text{Nb}$ -Josephson-Kontakten beträgt  $50 \text{ ff}/\mu\text{m}^2$ ]. Dieser Wert kann  $5$  mal geringer gemacht werden, wenn anstelle der Schichtdicke von  $1 \mu\text{m}$  nur  $200 \text{ \AA}$  zum Einsatz kämen. Ein Nachteil würde dann die Verringerung der maximalen kritischen Stromdichte und eine Reduktion der abgestrahlten Leistung sein.



Auf der anderen Seite weisen solche Kontakte den Vorteil einer kritischen Dämpfung auf. Der McCumber Parameter ist  $\beta = 2\pi I_C R^2 C / \Phi_0 \leq 1$  wobei  $\Phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15} \text{Vs}$  das Fluß-Quant,  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum und  $e$  die Elektronenladung ist. Es ist bekannt, daß  $\beta$  klein sein soll ( $\leq 1$ ), wenn eine optimale abgestrahlte Leistung und Durchstimmbarkeit der Frequenz gefordert ist.

Die obige Betrachtung ist auf den Fall einer einzelnen Gruppe (cluster) von Josephson-Kontakten beschränkt. Tatsächlich ist es aber möglich, die maximal abgestrahlte Leistung weiter zu erhöhen, indem man eine verteilte Anordnung solcher Gruppen wählt. Man kann Gruppen in äquidistantem Abstand in Entfernungen von  $\lambda$  zwischen ihnen (sagen wir  $\lambda = 300 \text{ mm}$  für  $\nu = 1 \text{ THz}$ ) anordnen.

Indem man die gesamte entstehende Struktur (Schicht) mit einem Isolierstoff (z. B.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CeO}_2$ , etc.) bedeckt und darüber eine Metallschicht (z. B. Gold oder Silber) aufbringt, läßt sich eine Transmissionsleitung schaffen, durch die die elektromagnetische Strahlung fortgeleitet wird (siehe Fig. 8).

Phasensynchronisation kann in solchen Strukturen über ziemlich lange Strecken erreicht werden, wodurch die abgestrahlte Leistung beträchtlich werden kann. Der Nachteil solcher Leitungen ist aber offenbar, daß die Betriebsfrequenz wegen der Gruppenabstände  $\lambda$  ziemlich festgelegt ist. Höhere Leistung läßt sich nur um den Preis einer verringerten Durchstimmbarkeit erzielen.

Weitere Aspekte zur Optimierung beinhalten die Integration einer Antenne, wobei bequemerweise die existierende supraleitende Schicht dafür herangezogen werden kann.

#### 4. Mikrowellen-Strahlungsquelle

Nachdem man eine Dünnschichtstruktur mit einer Anordnung von Mikrobrücken (im allgemeinen in paralleler und Serienschaltung) hergestellt und mit weiteren Standardkomponenten der Mikrowellentechnik (Antenne, Ausbreitungsleitung) verbunden hat, kann man diese an eine übliche Steuerelektronik mit regelbarer Stromquelle (bis zu  $100 \text{ mA}$ ), Steuereinrichtungen, Anzeigen für Frequenz und Leistung, usw. anschließen. Dies stellt dann eine komplette Quelle für schmalbandige elektromagnetische Strahlung dar, die in einem weiten Frequenzbereich und bis zu hohen Frequenzen von  $5\text{--}10 \text{ THz}$  durchgestimmt werden kann.

Dieses Bauelement der vorliegenden Erfindung wird von uns als Grundvariante des Tunneltrons bezeichnet. Es ist in Fig. 9 gezeigt.

#### 5. Anwendungsbereiche

Die vorliegende Erfindung ist in beinahe allen Anwendungsbereichen einsetzbar, in denen Millimeter und Submillimeterwellen-Strahlung emittiert oder detektiert wird. Außerdem eröffnen sich gänzlich neue Anwendungsfelder, wofür im folgenden einige Beispiele gegeben werden:

Einige Laser und Rückwärtswellen-Röhren (Carcinotrons) arbeiten im Submillimeterwellen-Gebiet, sie sind jedoch voluminöse Strahlungsquellen mit hohem Leistungsverbrauch. Festkörper-Oszillatoren, wie z. B. GUNN- oder IMPATT-Dioden, sind auf den Millimeterwellenbereich beschränkt.

Josephson-Kontakte, die an den Außenwiderstand re-

flexionsfrei angepaßt und zu einem Netzwerk zusammengefaßt sind, können über eine Spannung gesteuert werden und einen breiten Frequenzbereich bis in das Terahertz-Gebiet hinein überdecken.

Quantendetektion elektromagnetischer Strahlung, — ein umfangreich genutztes Konzept im sichtbaren und infraroten Spektralbereich —, war bisher im Mikrowellen- und Millimeterwellen-Gebiet nur im schmalen Bereich des Spektrums möglich, der sich um die Resonanzfrequenz von MASER-Verstärkern gruppiert. Die Standardmethoden zum Nachweis in diesem Frequenzbereich nutzen nichtlineare elektrische Widerstände, wie z. B. Schottky-Dioden als klassische Gleichrichter und Überlagerungsempfänger. Deren Arbeitsprinzip gründet sich auf die Umwandlung von empfangener Leistung zwischen verschiedenen Frequenzbereichen, anstelle der Konversion von Photonen in elektrische Ladungsträger, dem Funktionsprinzip von Quantendetektoren.

Die abrupte Nichtlinearität in der I-U-Kennlinie von SIS-Tunnelbarrieren für Einteilchentunneln stellt eine nutzbare Eigenschaft für resistives Mischen dar. Überlagerungsempfänger mit Josephson-Kontakten als solche Mischstufen weisen eine Empfindlichkeit auf, die sich dem Quantenlimit bei Frequenzen bis zu mehreren GHz nähert. Die Funktion eines Überlagerungsempfängers (Heterodyns) besteht darin, ein schwaches Nutzsignal der Frequenz  $\nu_s$  mit der Frequenz eines Lokaloszillators  $\nu_{LO}$  zu mischen, wobei eine Zwischenfrequenz  $\nu_{IF} = |\nu_s - \nu_{LO}|$  entsteht und elektronisch weiterverarbeitet wird. Ein Photonenstrom mit einer Eintreffrate von einem Photon pro Nanosekunde ist ein typischer Wert der Nachweisempfindlichkeit eines solchen Empfängers. Solche Lichtleistungen sind typisch für die Radioastronomie, die im Millimeter- und Submillimeterwellen-Gebiet interstellare Materie zur Erklärung der Struktur des Universums untersucht. Zwischen  $100$  und  $1000 \mu\text{m}$  Wellenlänge treten zahlreiche Linien molekularer Rotations- und Vibrations-Spektren auf, die im Prinzip zur Aufklärung zahlreicher physikalischer Eigenschaften im Universum herangezogen werden können. Forschungen der  $115 \text{ GHz}$ -Rotationsschwingung des interstellaren Kohlenmonoxids ( $\text{CO}$ ) mit einem Empfänger für  $\lambda = 2,6 \text{ mm}$  deutet auch auf das Leistungsvermögen solcher Mikrowellenspektrometer in anderen praktischen Anwendungen hin.

Spektroskopie in seiner allgemeinen Bedeutung impliziert die Untersuchung von Absorption und Emission elektromagnetischer Strahlung von Stoffen, die von einer externen Quelle angeregt werden oder selbst emittieren. Das Tunneltron-Bauelement weist die besondere Eigenschaft auf, daß es als Anregungsquelle des zu spektroskopierenden Mediums und als Strahlungsempfänger der aus dem Medium heraustretenden Strahlung eingesetzt werden kann. Um ein Beispiel zu nennen: Das Tunneltron ermöglicht die Untersuchung organischer und anorganischer Verbindungen in Dämpfen, Flüssigkeiten und Festkörpern bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung und geometrischen und energetischen Struktur sowie auch von Wechselwirkungsprozessen; All dies ist möglich in Funktion verschiedener äußerer Parameter und im zeitaufgelösten Regime. Es gibt zahlreiche Fälle, wo spektroskopische Messungen von Interesse sind, z. B. beim Nachweis auch versteckter Stoffe organischer Moleküle und chemischer Verbindungen (biologische Substanzen, Drogen und Plastik-Stoffe, ...) nach einer geeigneten Anregung im Submillimeterwellen-Gebiet, oder auch Geräte zur Qualitätskontrolle für

spezifische Substanzen (z. B. Wassergehalt oder Verunreinigungen in festen Stoffen, Fettschichtdicken auf Fleischunterlagen, etc.).

Das Tunneltron als kohärente und durchstimmbare Strahlungsquelle weist Eigenschaften des Wellenfeldes auf, die z. B. bei der Interferometrie und Holographie zum Tragen kommen. Holographie ist im Prinzip eine Methode zur Erzeugung einer einzigartigen fotografischen Abbildung eines kohärent belichteten Objekts, bei der ein ungestörter (direkter) Strahl und der vom Objekt herrührende reflektierte Strahl in einem Nachweissystem zur Interferenz gebracht werden. Die Rekonstruktion dieses Interferenzbildes liefert ein dreidimensionales Bild des Objekts.

Die Möglichkeit der Frequenzdurchstimmung des kohärenten Tunneltrons, sowie auch die Möglichkeit der Ausbreitung durch Medien, die für das menschliche Auge undurchsichtig, für die Submillimeter-Strahlung des Tunneltrons jedoch transparent sind, eröffnet zahlreiche weitere Anwendungen.

Kommunikation und Datenübermittlung ist ein weiteres Anwendungsgebiet des hier vorgeschlagenen Bauelements, wobei ein Frequenzband zugänglich wird, das weit oberhalb desjenigen liegt, das bisher von der ITU (Intern. Telecom. Union) verwaltet wird. Das neue Frequenzgebiet ermöglicht eine beträchtliche Erhöhung der Zahl nutzbarer Kanäle sowohl für Satelliten- als auch für erdgebundene Kommunikation. [Betrachtet man eine Kanalbreite von 20 MHz, dann liefert der Frequenzbereich bis 5 THz etwa 250 000 Kanäle. Dies ist zu vergleichen mit den beispielsweise 40 Kanälen für die Satellitenkommunikation im Frequenzband von 11,7–12,5 GHz, das von der ITU für die Region 1, Afrika, Europa und die frühere Sowjetunion zusammen, zur Verfügung gestellt wurde.] Nimmt man eine 4 kHz-Kanalbreite für Sprachkommunikation an, würde man 2 Milliarden Sprachkanäle erzeugen, die auf einen solchen Träger transportiert werden könnten.

Übertragung auf hohem Qualitätsstandard erfordert digitale Systeme mit Impulsmodulation (PCM — pulse code modulation), da Frequenzmodulation die Rauschleistung weit über das Maß von 3 pW/km (etwa 52 dB) treiben würde, das von der CCIR als obere Rauschgrenze empfohlen wurde.

Digitale Systeme lassen eine Regeneration der Signale in Zwischenstationen zu, wodurch die Anhäufung von Fehlern vermieden wird.

Es ist selbst dankbar, daß ein völlig neues drahtloses terrestrisches Mikrowellenkommunikations-Netzwerk, ein breitbandiger drahtloser Link zum Internet und ein breitbandiger Link zur Satellitenkommunikation mit allen genannten Vorteilen der hohen Zahl von Telefonie-Kanälen und dem zusätzlichen Nutzen einer reduzierten Strahlungsbelastung infolge der verringerten Absorptionstiefe der menschlichen Haut für Submillimeter-Strahlung geschaffen wird.

Bildgebende Multifrequenz-Mikrowellen-Radiometer (MIMR) für die Erkundung des erdnahen Gebiets von Satelliten oder anderen Flugobjekten aus hat bereits ein hohes Nutzungspotential. Zukünftige Fernerkundungs-Satelliten werden hyperspektrale Gerätschaften mit sich führen, die zur bildgebenden Erkundung in einer großen Zahl von Frequenzkanälen geeignet sind, anstelle der sieben Kanäle, die gegenwärtig mit multispektralen Instrumenten zum Einsatz kommen.

Bildgebende Rundum-Beobachtung aus nächster Nähe ist bedeutungsvoll für die Sicherheit und Manövrierbarkeit von Hubschraubern und den Landeanflug von

Flugzeugen.

Ähnliches trifft auf den straßengebundenen Verkehr und selbst für Roboter-Anwendungen mit widrigen Umgebungsbedingungen zu. Das Grunderfordernis ist hierbei immer ein leistungsfähiger, durchstimmbarer, möglichst monochromatischer und kohärenter Submillimeterwellen-Emitter (und entsprechender Detektor), so wie das mit dem Bauelement der vorliegenden Erfindung zur Verfügung gestellt wird.

Als "on-chip"-integriertes bzw. separates Emitter- und Detektor-Bauelement ist es für Radarmessungen im allgemeinsten Sinn geeignet, d. h., für Ortungs-, Navigations- und Früherkennungssysteme. Dem wachsenden Bedarf von kompakten Radar-Baugruppen niedriger Leistung für zivile und militärische Nutzung kommt das erfindungsgemäße Bauelement entgegen. Alarmgebende oder auch Kollisionswarn-Systeme können verbessert werden.

Das Tunneltron kann ein aktiver Sensor für SAR (synthetic aperture radar)-Anwendung sein. Ein SAR-System sendet Mikrowellenstrahlung auf das Objekt (die Erde, wenn Forschungssatelliten der Ausgangspunkt sind), und empfängt die zurückkommende Strahlung. Die Feinabstimmung des Emitters läßt eine Positionierung der Frequenz innerhalb von Absorptionsband-Minima der Atmosphäre zu. Die Möglichkeit, die Richtung des Wellenfeldes des Tunneltrons elektronisch zu verändern, erweist sich als weiterer Vorteil zur Abstrahlung des Beobachtungsgebietes.

Biologische und medizinische Anwendungen (Tomographie, bildgebende Thermographie usw.) sind in großer Zahl aus den Eigenschaften des erfindungsgemäßen Bauelements einfach zu schlußfolgern.

#### Patentansprüche

1. Emitter- und/oder Detektorbauelement für Submillimeterwellen-Strahlung, bestehend aus einem Substrat, elektrischen Zuführungen (Leitungen) an die Elektroden, die sich zu beiden Seiten des Bauelements auf einem Supraleiter befinden und mit einer äußeren Stromquelle verbunden werden, dadurch gekennzeichnet, daß das Bauelement in einer dünnen, einkristallinen und a-Achsen-orientierten Schicht eines Hochtemperatur-Supraleiters (HTS) durch Ausbildung von Mikrobrücken (a) und isolierenden Gräben (b) so geschaffen ist, daß die Mikrobrücken (a) beidseitig von supraleitenden Kontakten (c, d) des die Schicht bildenden Hochtemperatur-Supraleiters ausgehen und durch entsprechende Führung der Gräben (b) in beliebiger Weise in Reihen- und/oder Parallelschaltung kombinierbar und einzeln oder in Gruppen extern steuerbar sind.
2. Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die HTS-Schicht epitaxial mit der c-Achse parallel zur Substratoberfläche gewachsen ist, und die a-Achse mit einem Winkel von 1° bis 89° gegenüber der Normalenrichtung auf das Substrat geneigt ist.
3. Bauelement nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine Anordnung (Array) von mindestens zwei bis einigen hundert Mikrobrücken in Parallelschaltung, mit jeweils zwei bis einigen hundert vertikal gestapelten Josephson-Kontakten pro Mikrobrücke, wobei alle Mikrobrücken über gemeinsame supraleitende elektrische Kontakte verfügen.

4. Bauelement nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrischen Kontakte eine Spannungsmessung für Detektorbetrieb erlauben.
5. Bauelement nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Parallel-Baugruppen, die durch eine geeignete Grabenführung zur Bildung eines Segmentes führen, in Reihe geschaltet sind.
6. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine verteilte Anordnung vollständiger Gruppen von Mikrobrücken entlang eines Mikrowellen-Streifenleiters zur Erzielung einer höheren abgestrahlten Leistung.
7. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Verwendung für die Kommunikation und Datenübertragung.
8. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Verwendung in Radaranlagen.
9. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet für Anwendungen als Vielkanal-Emitter- und Detektor in satellitengestütztem SAR (Synthetic Aperture Radar).
10. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Verwendung in bildgebenden Mehrkanal-Mikrowellen-Radiometern.
11. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch jede Art spektroskopischer Anwendung.
12. Bauelement nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Verwendung als Lokaloszillator in Überlagerungsempfängern, beispielsweise für astronomische Anwendungen eingesetzt.
13. Verfahren zur Herstellung eines Emitter und/oder Detektorbauelements für Submillimeterwellen-Strahlung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)-Schicht durch Molekularstrahlepitaxie (MBE) und analoger Verfahren, wie z. B. der Atomlagenepitaxie (ALE), der Feinfokus-Ionenstrahlepitaxie (FIBE) erzeugt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Molekularstrahlepitaxie (MBE)-Gerät spektroskopische Mittel zur Beobachtung der Grenzfläche und zur Steuerung des Wachstums der HTS-Schicht aufweist.
15. Verfahren nach Anspruch 13 und/oder 14, gekennzeichnet durch die folgenden Prozeßschritte:
  - (a) Epitaxiales Aufwachsen einer HTS-Schicht mit geneigter a-Achse, 100—500 nm dick, auf einem geeignet geschnittenen Wafer (Substrat) mit oder ohne eine oder mehrere Pufferschichten.
  - (b) Lithographie zur Herstellung der Gräben.
  - (c) Ionenätzen bis zur Substratoberfläche.
  - (d) Entfernung des Photolacks.
  - (e) Anbringen von Metallkontakten an die HTS-Elektroden.
16. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die HTS-Schicht durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) und analoger Verfahren hergestellt wird.

17. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die HTS-Schicht durch Laserimpulsabscheidung (PLD) und analoger Verfahren hergestellt wird, eingeschlossen der Fall, daß das PLD-Gerät über spektroskopische Mittel zur Grenzflächenbeobachtung und Steuerung des Wachstumsvorganges ausgestattet ist.
18. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die HTS-Schicht durch Sputterabscheidung (SD) und analoger Verfahren hergestellt wird, eingeschlossen der Fall daß das SD-Gerät über spektroskopische Mittel zur Grenzflächenbeobachtung und Steuerung des Wachstumsvorganges ausgestattet ist.
19. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Bauelemente-Struktur unter Verwendung von Mikromasken erzeugt wird.

---

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

---

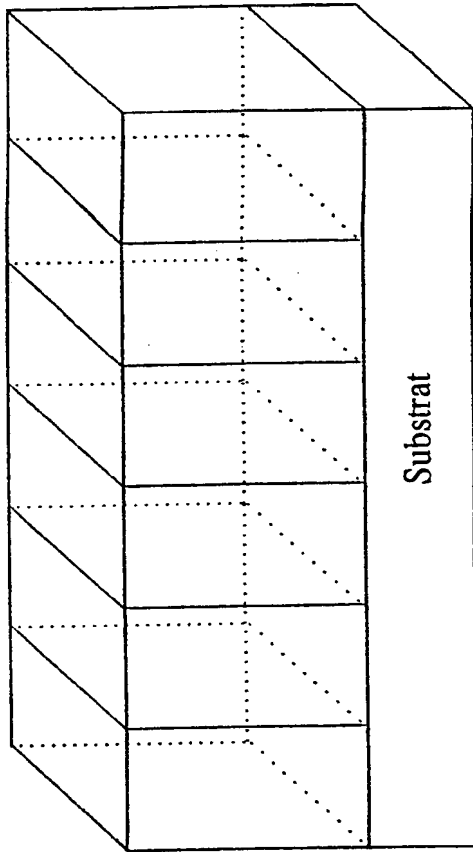


Fig. 2.

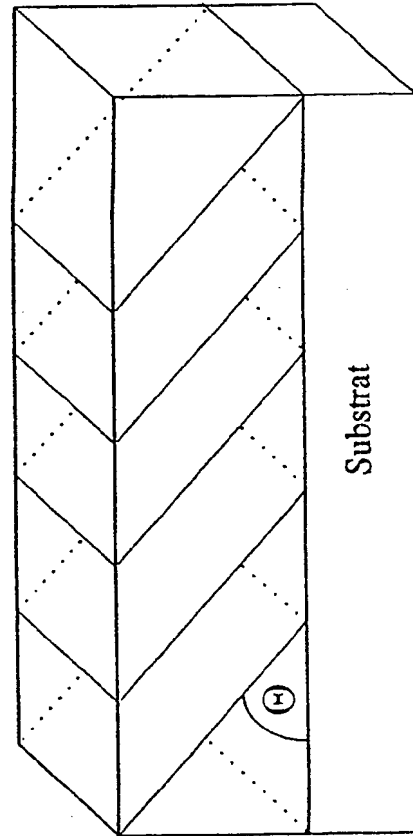


Fig. 3.

Fig. 1.

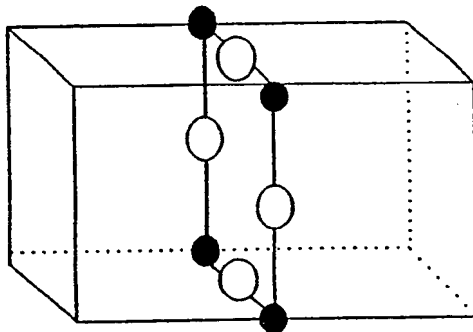


Fig. 4.B.

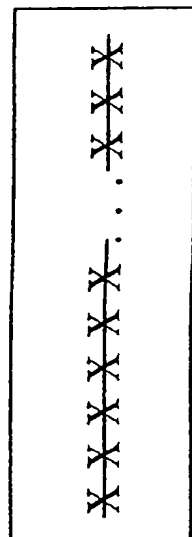


Fig. 4.A.

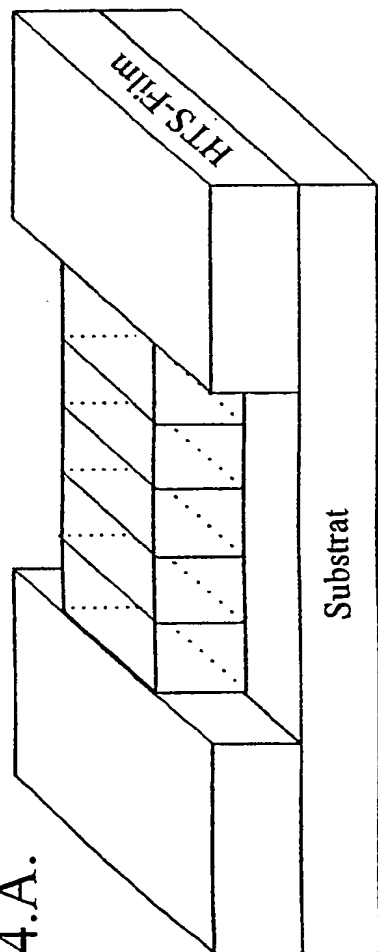
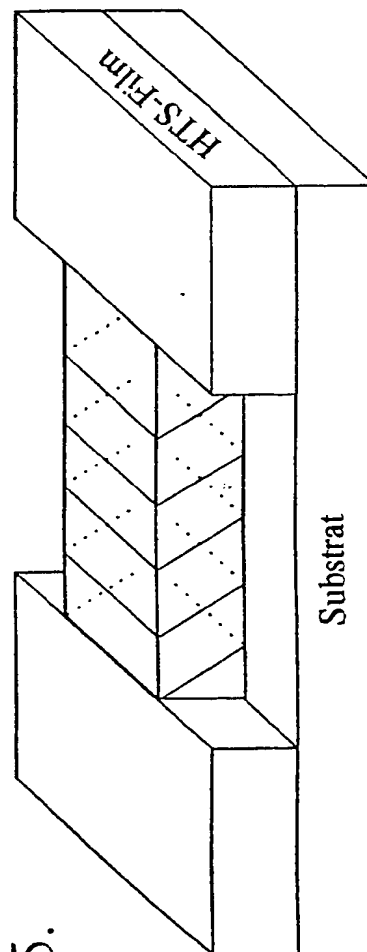


Fig. 5.



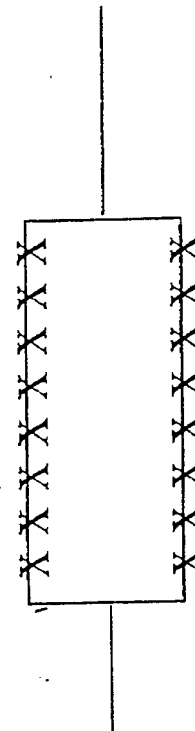
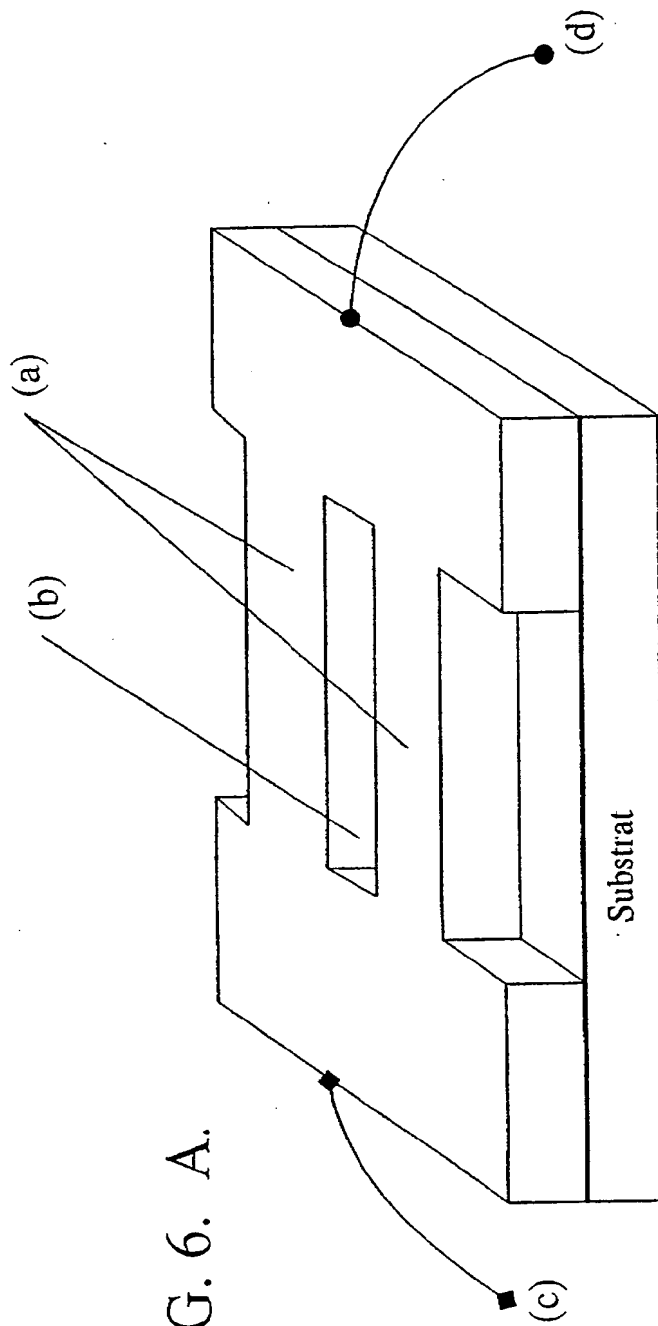
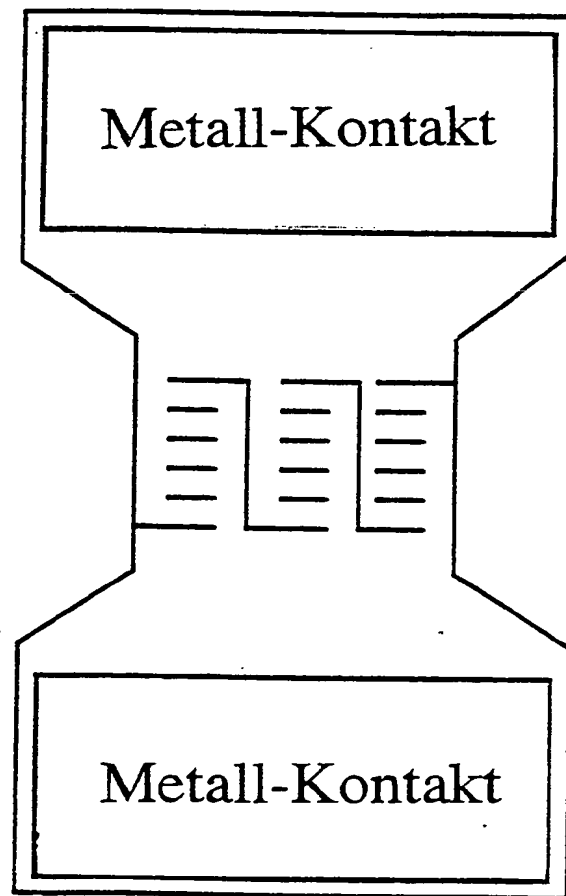




Fig. 7.A.



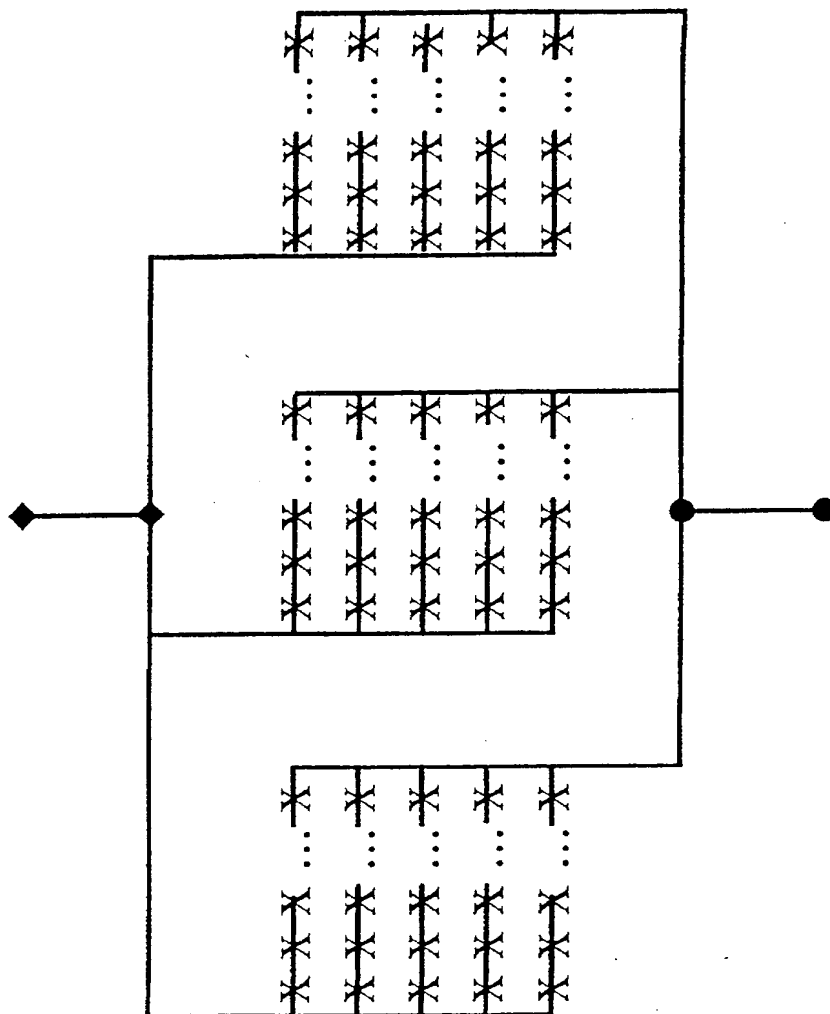


Fig. 7.B.

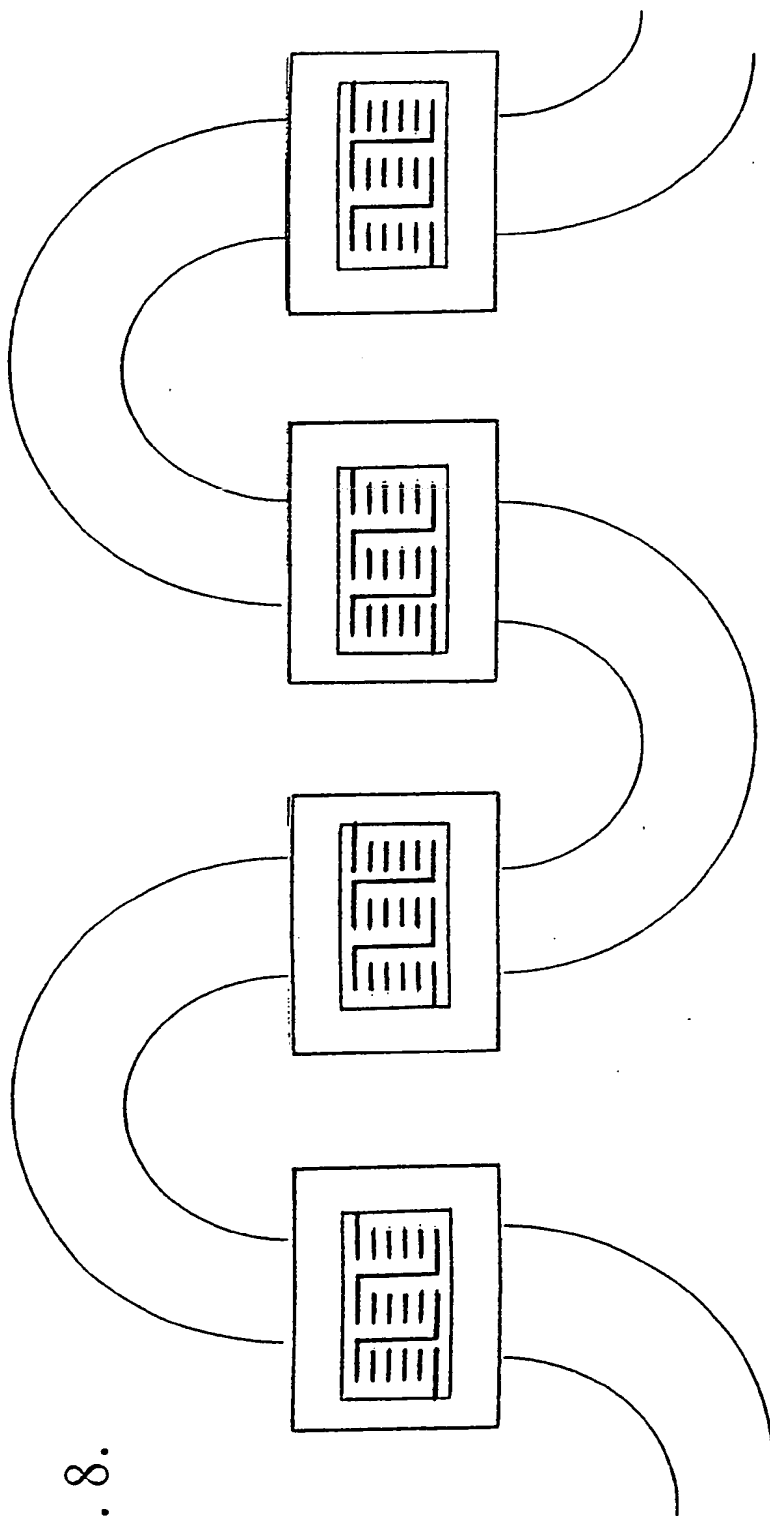
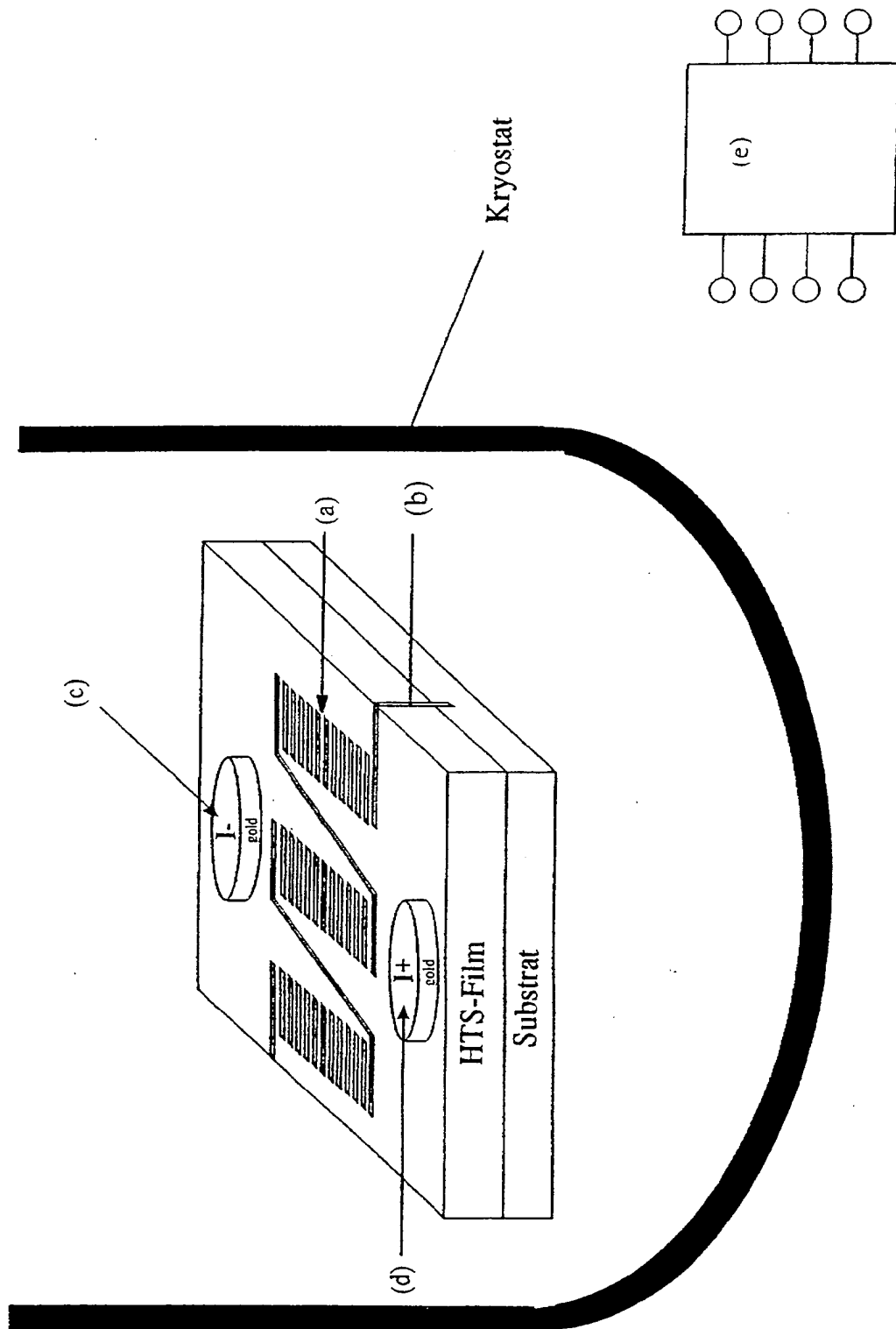


Fig. 8.

FIG. 9



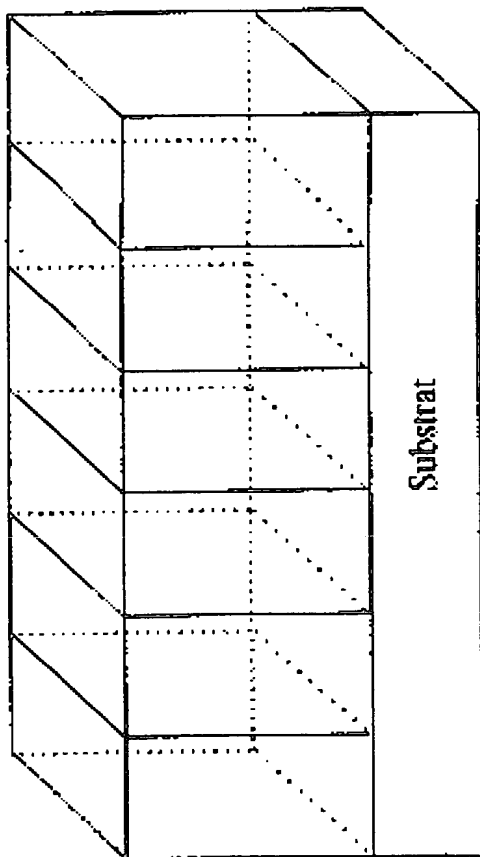


Fig. 2.

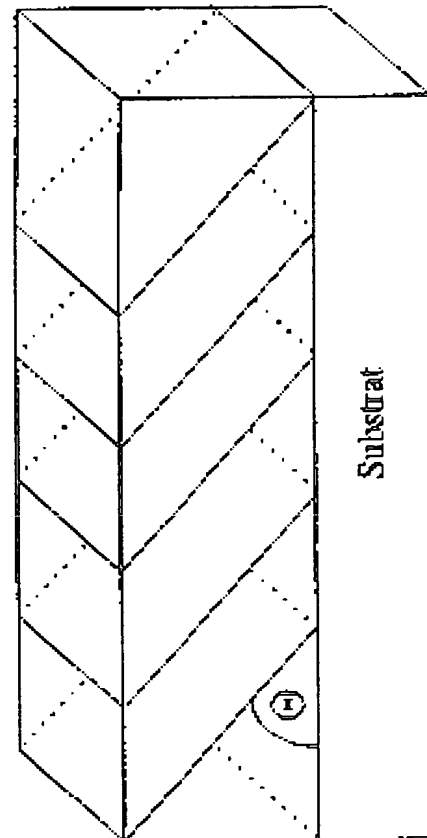


Fig. 3.

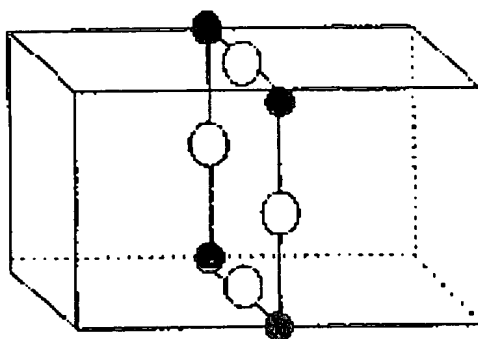


Fig. 1.

Fig. 4.B.

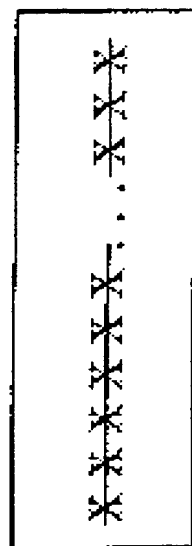
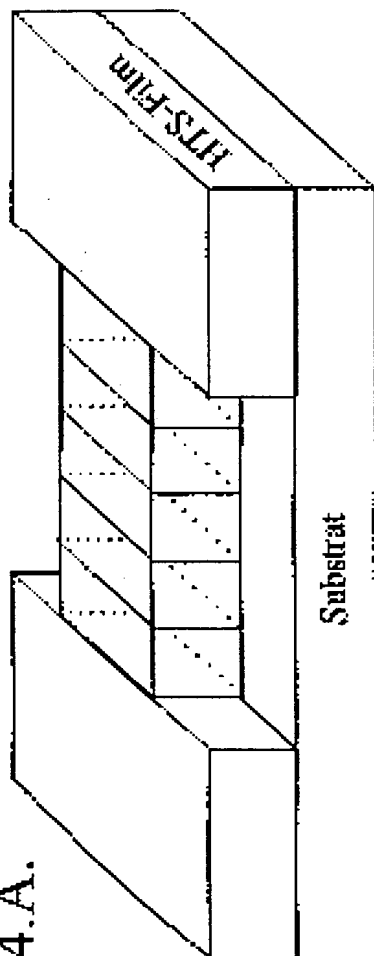
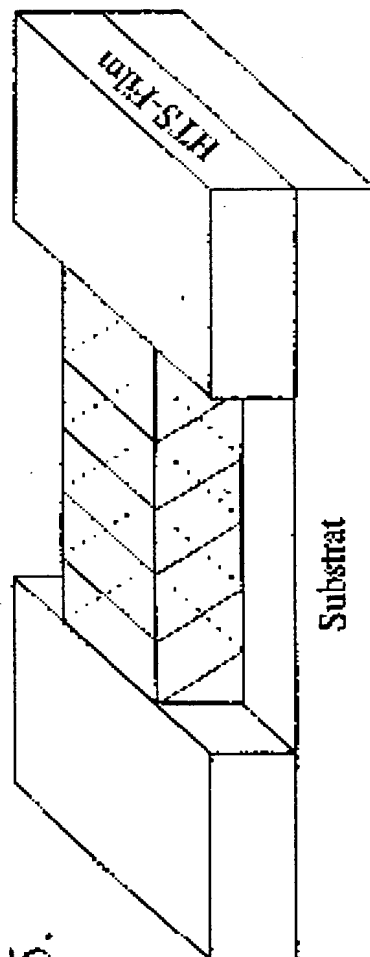


Fig. 4.A.



5  
Fib





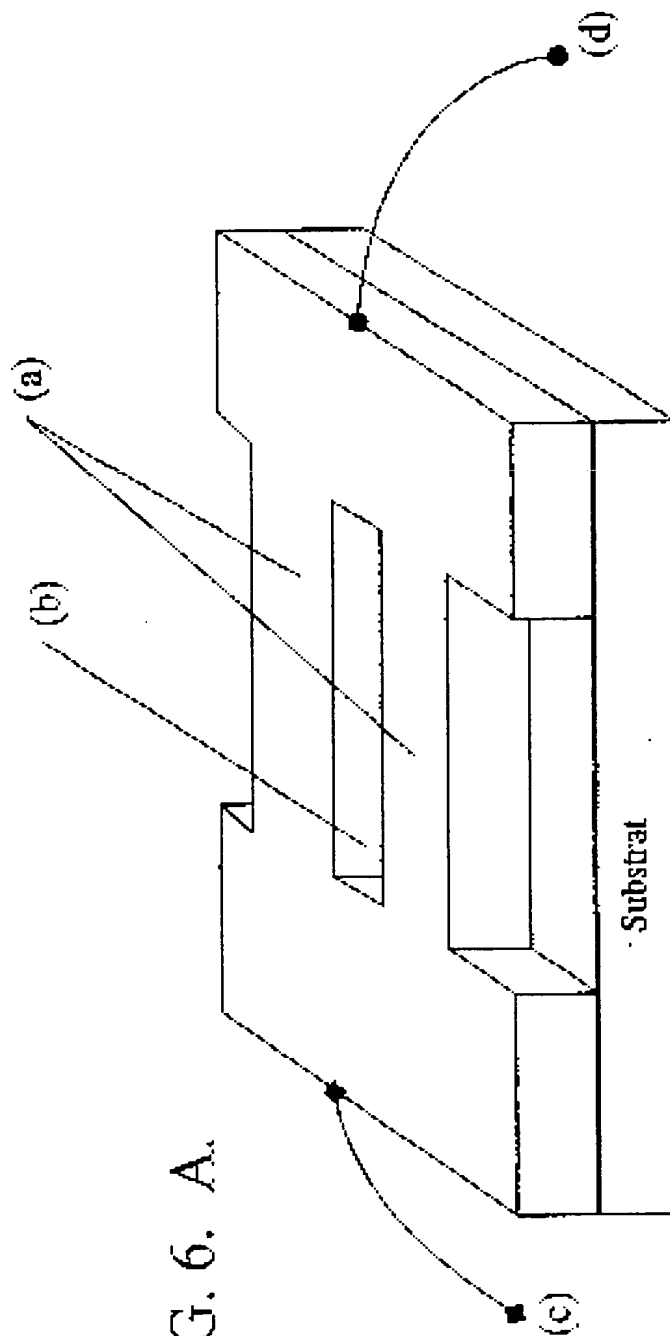


FIG. 6. A.

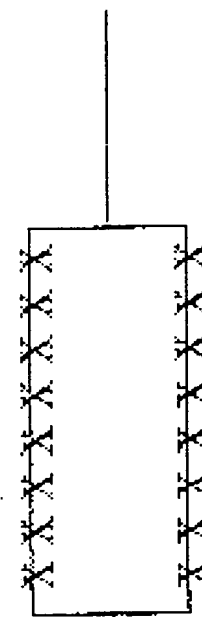
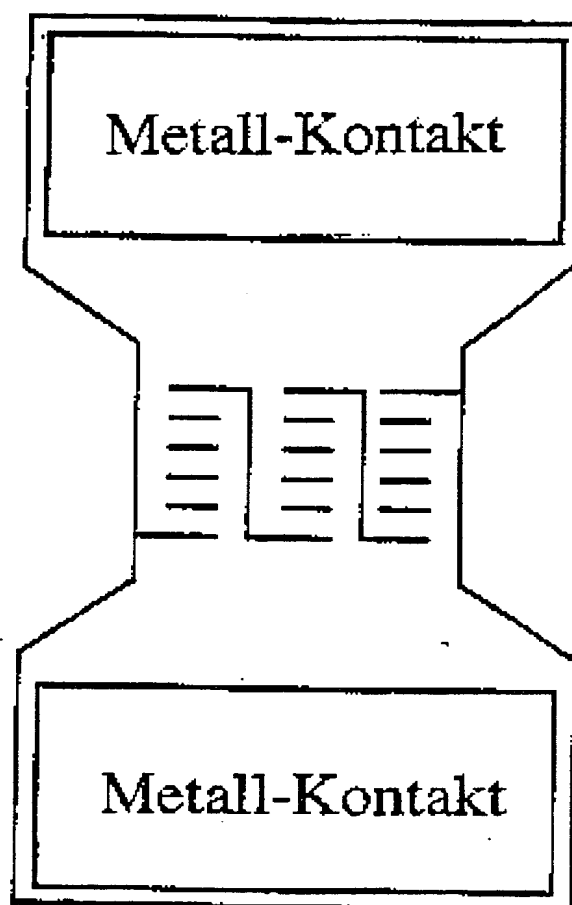


FIG. 6. B.

Fig. 7.A.



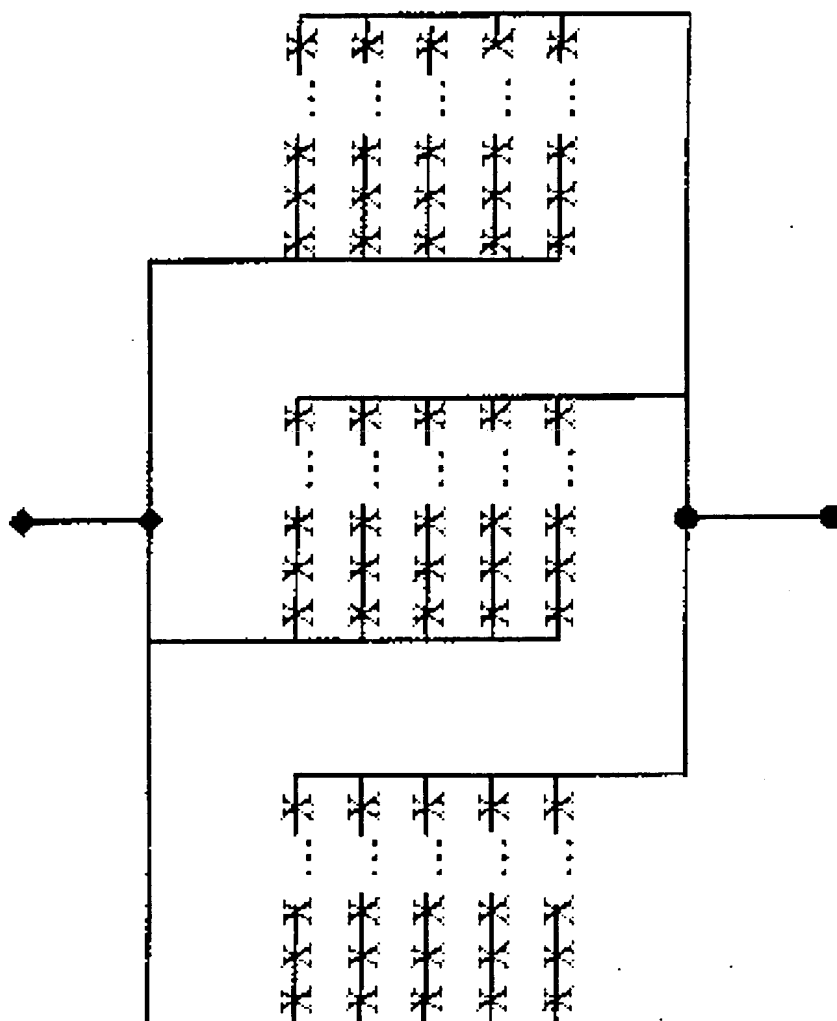


Fig. 7. B.

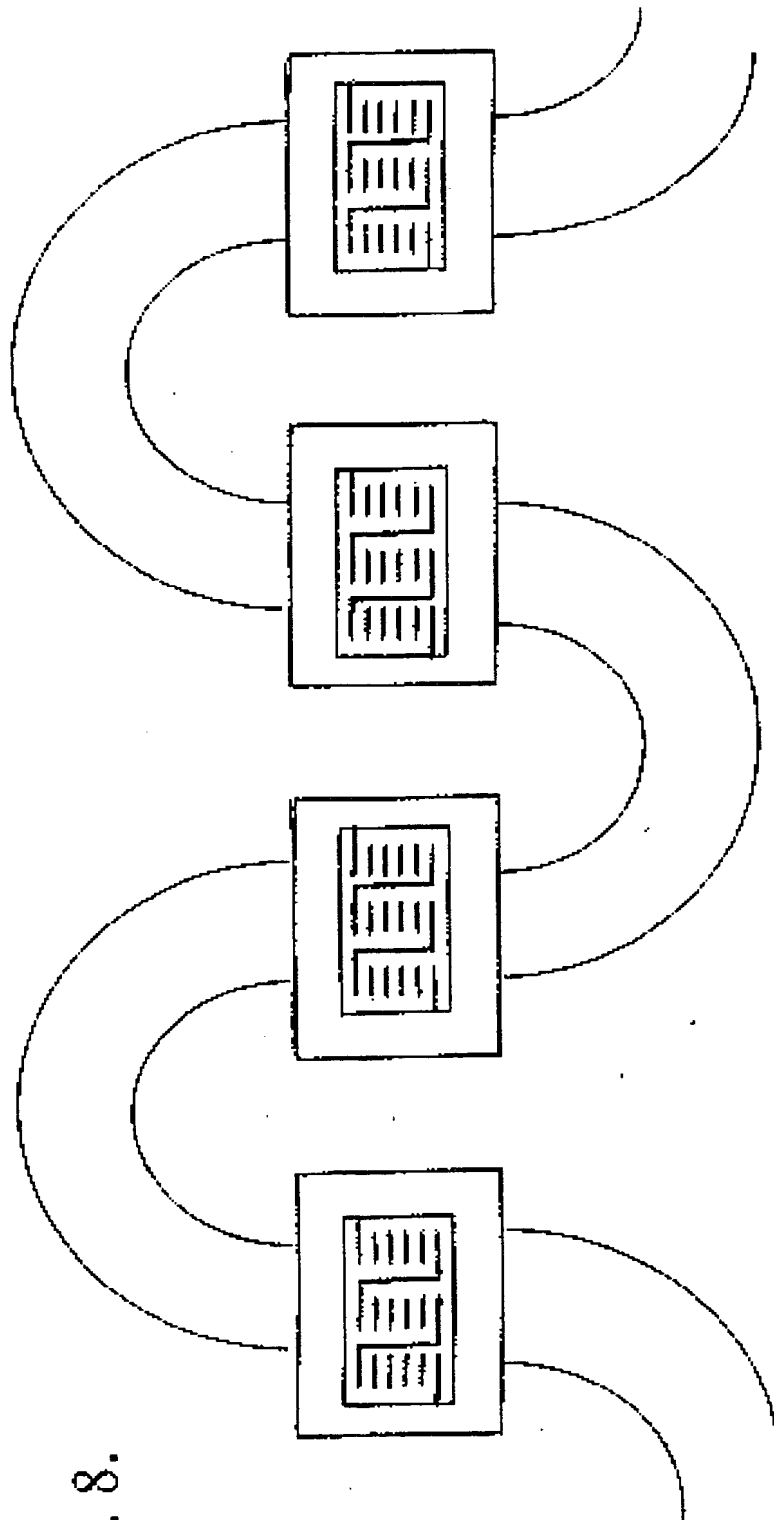


Fig. 8.

FIG. 9

